

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра автоматики та управління в технічних системах**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

«__» _____ 20__ р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютеризовані системи управління»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Система керування гіроскопічними транспортними платформами»**

Виконав:

Студент IV курсу, групи ІА-61

Лясковець Юрій Олександрович _____

Керівник:

Заступник декана, к.т.н., доцент

Писаренко Андрій Володимирович _____

Рецензент:

доцент кафедри ТК, к.т.н., доцент

Ткач Михайло Мартинович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра автоматики та управління в технічних системах

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані системи управління»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Лясковця Юрія Олександровича

1. Тема проєкту «Система керування гіроскопічними транспортними платформами», керівник проєкту Писаренко Андрій Володимирович к.т.н, доцент затверджені наказом по університету від « 07 » травня 2020р. №1081-с.
2. Термін подання студентом проєкту 9 червня 2020 року _____
3. Вихідні дані до проєкту електродвигун НРМ-20KW, потужність 20 кВт, напруга 96 В, сила струму 230 А, мотор-колеса, радіус 0.508 м, система керування транспортною платформою
4. Зміст пояснювальної записки: загальні відомості, огляд існуючих рішень, розробка схеми електричної структурної, розробка схеми електричної функціональної, вибір окремих елементів, розроблення математичної моделі, синтез системи керування
5. Перелік графічного матеріалу: схема електрична структурна, схема електрична функціональна, модель системи, результати моделювання
6. Дата видачі завдання 28 квітня 2020 року _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	01.05.20 – 10.05.20	
2	Розробка схеми електричної	10.05.20 – 15.05.20	
	структурної		
3	Розробка схеми електричної	15.05.20 – 20.05.20	
	функціональної		
4	Вибір окремих елементів	20.05.20 – 24.05.20	
5	Розроблення математичної моделі	24.05.20 – 30.05.20	
5	Синтез системи керування	01.06.20 – 06.06.20	
6	Оформлення документації	06.06.20 – 15.06.20	

Студент

Юрій ЛЯСКОВЕЦЬ

Керівник

Андрій ПИСАРЕНКО

АНОТАЦІЯ

Лясковець Ю.О. Система керування гіроскопічними транспортними платформами. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2020.

Проект складається з семи розділів та містить 60 с. тексту, 29 рисунків, 2 таблиці, посилання на 27 літературних джерел, 3 додатки та 4 конструкторських документи.

Ключові слова: транспортний засіб, система керування, LQR-регулятор, гіроскоп, простір станів, гіроскопічна платформа, стабілізація рівноваги, мотор-колесо.

Об'єктом розробки є система керування гіроскопічними транспортними платформами.

Метою даного проекту є розширення використання дорожнього покриття за рахунок забезпечення руху гіроплатформ.

У дипломному проєкті розроблено цифрову модель системи керування гіроскопічними транспортними платформами. Розроблено структурну та функціональну схеми, розроблено математичну модель, синтезовано LQR-регулятор. Зроблено розрахунки необхідної потужності для певних елементів системи керування. Моделювання системи здійснювалося з використанням пакету прикладних програм MATLAB/Simulink.

Отримані результати можуть бути корисними для розробки та моделювання поведінки подібних систем.

ANNOTATION

Liaskovets Y.O. Control system of gyroscope transport platforms. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, 2020.

The project consists of 7 chapters and contains 60 p. of text, 29 figures, 2 tables, references to 27 sources of literature, 3 appendices and 4 design documents.

Keywords: vehicle, control system, LQR-regulator, gyroscope, state space, gyroscopic platform, balance stabilization, wheel hub motor.

The object of development is a control system for gyroscopic transport platforms.

The purpose of this project is to expand the use of the road surface by ensuring the movement of gyro platforms.

In the diploma project a digital model of the control system of gyroscopic transport platforms was developed. The structural and functional schemes were developed, the mathematical model was developed, the LQR-regulator was synthesized. The calculations of the required power for certain elements of the control system were made. The system was simulated using the MATLAB/Simulink application package.

The results obtained can be useful for developing and modeling the behavior of such systems.

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Система керування гіроскопічними транспорт-
ними платформами»**

Київ – 2020 року

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	6
2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ.....	10
2.1 Висновки до розділу.....	17
3 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ.....	18
3.1 Висновки до розділу.....	20
4 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ	21
4.1 Висновки до розділу.....	27
5 ВИБІР ОКРЕМИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	28
5.1 Ходова частина.....	28
5.2 Двигун постійного струму	29
5.3 МЕМС-гіроскоп.....	31
5.4 GPS модуль.....	32
5.5 5G/LTE модуль	33
5.6 Висновки до розділу.....	34
6 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ.....	35
6.1 Фізичні характеристики транспортної платформи.....	35
6.2 Рівняння руху транспортної платформи	36
6.3 Перехід у простір станів	39
6.4 Розроблення моделі у MATLAB/Simulink	42
6.5 Висновки до розділу.....	44
7 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	45
7.1 Синтез регулятора	45
7.2 Моделювання системи	47
7.3 Висновки до розділу.....	56

					ІА61.130БАК.005 ПЗ		
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив	Лясковець				Система керування гіроскопічними транспорт- ними платформами Пояснювальна записка	Літ.	Аркуш
Перевірів	Писаренко						2
						Аркуші	63
Н. контр.						«КПІ ім. Ігоря Сікорського» ФІОТ Група ІА-61	
Затвер-							

ВИСНОВКИ	57
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	58
ДОДАТОК А	Помилка! Закладку не визначено.
ДОДАТОК Б	Помилка! Закладку не визначено.
ДОДАТОК В.....	Помилка! Закладку не визначено.

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
						3
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		

ВСТУП

На сьогоднішній день гостро стоїть питання заторів у міському автомобільному русі. Великий потік машин призводить до швидкого зносу дорожнього покриття, створення вібрацій на будівлях, що межують з покриттям, що з часом призводить до утворення тріщин і руйнування фасадів, забруднення повітря через викиди двигунів внутрішнього згоряння, постійний шум. Пропускної здатності доріг не вистачає для кількості машин, що зростає з кожним днем.

Альтернативою розширенню покриття є ефективне використання простору між та над автомобілями. Ефективніше всього це буде для автомобілів екстрених служб, тому що для них важлива кожна хвилина, витрачена на шлях, та для міського транспорту, адже його найбільше у великих містах.

Ідея полягає у створенні гіроскопічної транспортної платформи, яка буде пересуватись по місцевості поміж іншого автотранспорту, за принципом двоколісного транспорту, проте на рівень вище, створюючи цим додатковий рівень транспортного потоку за допомогою телескопічних опор та змінюючи висоту за необхідності. Цей принцип і зумовлює використання гіроскопу у вигляді гіростабілізатору, адже опори платформи знаходяться на одній осі, тому виникає потреба в збереженні рівноваги.

Гіроскопічний ефект широко використовується у багатьох сферах діяльності людини: в судноплавстві для демпфірування хитавиці, в маленьких транспортних засобах для пересування в місті (гіроскутери), в мобільних пристроях, тощо. Тому використання гіроскопічного ефекту в автомобільній промисловості лише справа часу.

Актуальність дипломного проєкту полягає у дослідженні використання таких платформ, а саме розрахунок основних параметрів для побудови такого транспортного засобу.

Метою даного проєкту є розширення використання дорожнього покриття за рахунок забезпечення руху гіроплатформ.

Моделювання системи здійснювалося з використанням пакету прикладних

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
						4
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		

програм MATLAB/Simulink.

Для досягнення мети було поставлено та виконано такі завдання:

- дослідження використання гіроскопічного ефекту у різних сферах промисловості;
- розрахунок необхідних параметрів гіроплатформ;
- розроблення математичної моделі об'єкту керування;
- синтез цифрового регулятора;
- дослідження поведінки моделі.

					<i>IA61.130БАК.005 ПЗ</i>	Ар-
						5
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Гіроскопічна техніка має вже більш ніж вікову історію. У наш час неможливо уявити складні навігаційні системи без застосування на них гіроскопічних інерційних систем та інших гіроскопічних приладів. В основі роботи такої техніки лежить гіроскоп – пристрій, здатний реагувати на зміну орієнтації основи, на якій його встановлено. Його використовують як чутливий елемент ведучих гіроскопічних приладів, а також як датчик кута повороту або датчик кутової швидкості для систем керування. Також, в деяких системах гіроскопи використовують як генератори моменту сили або енергії. Типова структура гіроскопа наведена на рисунку 1.1.

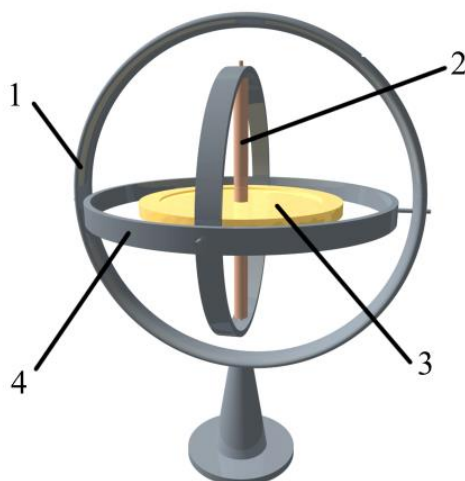


Рисунок 1.1 – Типова структура гіроскопа [1]:

1) корпус; 2) вісь ротора; 3) ротор; 4) внутрішня рама

Вперше гіроскоп знайшов практичне застосування в пристрої для стабілізації курсу торпеди, винайденому наприкінці XIX століття інженером Людвігом Обрі [2]. Гіроскоп встановлювався в карданному підвісі так, щоб його вісь обертання була паралельна поздовжній осі торпеди. Ротор гіроскопа приводився в обертання за кілька секунд до пострілу, коли вісь торпеди була вже направлена на ціль. При русі торпеди гіроскоп продовжував зберігати вихідний напрямок і при виникненні відхилень торпеди повертав її рулі таким чином, щоб забезпечити незмінність курсу.

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		6

Основними сферами використання гіроскопів в сьогоденні є судноплавство, авіація та космонавтика. Майже кожне морське судно обладнане гіроскопічними компасами для ручного або автоматичного керування курсом.

Літаки та вертольоти обладнуються гіроскопами для точних даних для систем навігації та стабілізації у просторі. Два гіроскопи зазвичай встановлюють на крилах літака, завдяки чому можна отримати інформацію про маневр літака щодо вертикальної осі. А от у безпілотних літальних апаратах встановлюють три гіроскопи, без яких неможливо керувати безпілотним апаратом та позиціонувати його у просторі. До таких приладів відносять авіагоризонт, гіровертикаль, гіроскопічний показчик крену і повороту. Також використовують гіростабілізовані магнітні компаси, фотоапарати з гіроскопами, гіросекстанти та інші «гіро»-пристрої [3].

Наявність гіроскопа обов'язкова для навігаційних систем. Такі датчики значно підвищують точність вимірювання у просторі, з точністю до пари сантиметрів. Через те що навігація по супутниковому зв'язку в певних випадках працює погано або взагалі не отримує сигнал, єдиним способом навігації є гіроскоп. Таку ситуацію найкраще можна споглядати в космосі або під водою. Тому для запобігання ситуацій з відсутністю навігаційних даних використовують комбінацію гіроскопічних та супутникових систем. Це забезпечує необхідну точність для визначення місця розташування об'єктів.

Неймовірну популярність гіроскопічна техніка отримала в кіно- та фото- індустріях. Завдяки використанню гіростабілізаторів камер отримуються фото і відео зображення з високою чіткістю. Приклад такого зображення представлено на рисунку 1.2.

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
						7
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		



Рисунок 1.2 – Порівняння зображення без використання гіростабілізатора та з його використанням [4]

Але гіроскопи та гіроскопічний ефект знайшли своє місце і в машинобудуванні. Їх використовують в машинах для вимірювання швидкості руху автомобіля відносно трьох осей: вертикальної, поперечної та повздовжньої. Основні задачі, які виконують гіроскопи в автомобілях це визначення крену машини чи бокових перекидань, навігаційні системи та контроль динаміки автомобіля за допомогою систем електронного контролю стійкості (Electronic Stability Control, ESC), а також антиблокувальна система (Anti-lock braking system, ABS). Також гіроскопи можуть використовуватись для корегування висоти та стабільності підвісу в залежності від кутової швидкості крену автомобіля.

Гіроскопи також знайшли своє застосування і при прокладенні тунелів для метро і залізничного транспорту (наземні маркшейдерські гіроскопи), і для з'ясування форми свердловин (інклінометри).

Велика кількість сучасних гіроскопічних пристроїв в автомобілях представляють з себе вібраційні коріолісові гіроскопи, в яких для визначення обертання використовується вібруючий механічний елемент. У більш ранніх версіях приладів використовувався макроскопічний п'єзоелектричний кристал кварцу для створення коливань. З розвитком MEMS-технологій все частіше цю функцію виконує кремнієвий кристал.

Незважаючи на відмінності в їх принципах роботи, конструкції і правилах використання, всі гіроскопічні прилади можна поділити на три групи: показчики, вимірники і регулятори [5].

До першої групи відносяться прилади, в яких гіроскоп використовується для пошуку або тільки фіксування певного напрямку: істинного меридіана, істинної вертикалі, довільного напрямку (гірокомпаси, гіровертикалі, гіроазимути).

До другої групи відносяться прилади, в яких гіроскоп служить для вимірювання певних величин, наприклад кутової швидкості або прискорення рухомого об'єкту (гіротахometri, гіроакселерометри тощо).

До третьої групи відносяться прилади, в яких гіроскопи керують допоміжними електродвигунами для стабілізації різних пристроїв по заданому напрямку, наприклад для стабілізації гіроскопічних платформ, прийомних антен різних пристроїв тощо.

					<i>ІА61.130БАК.005 ПЗ</i>	Ар-
						9
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

Для розробки в дипломному проєкті було обрано концепт з гіроплатформами [6]. Суть концепту полягає в раціональному використанні місця між машинами на дорозі. Тобто платформа рухається на двох телескопічних опорах за принципом велосипеда. Але оскільки це лише концепт, таких платформ не існує. Приклад концепту такої платформи зображено на рисунку 2.1. Для кращого розуміння гіроскопічного ефекту було розглянуто гіропристрої які широко використовуються нині у різних сферах життя.

Одним з представників автомобілів на гіроскопічному ефекті є концепт Ford Gyron [7]. Вперше такий автомобіль було представлено в 1961 році в Детройті. Зовнішній вигляд автомобіля нагадував реактивний літак. Овальний кузов був спроектований на основі фюзеляжу літака, всі основні елементи автомобіля знаходились усередині. Решітка радіатора, яка знаходилась спереду, нагадувала сопло повітрозбірника реактивного винищувача. Зовнішній вигляд такого автомобіля представлений на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд двоколісного автомобіля Ford Gyron [7]

В конструкції автомобіля Gyron стабілізатором стійкості був маховик діаметром 60 см. Він обертався зі швидкістю 6000 об/хв. Для приведення автомобіля в рух використовувались електромотори, які розганяли його до максимальних

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		10

8 км/год – цього було достатньо для показу можливостей гіростабілізатору. Оскільки автомобіль тримав рівновагу лише коли їхав завдяки гіроскопічному ефекту, інженери компанії Ford додали невеликі опори, які призначались лише для стоянки.

Взагалі, з практичної точки зору виникало дуже багато питань, пов'язаних з експлуатацією двоколісного автомобіля на дорогах та його ергономікою. Багажне відділення було відсутнє через те що всі вільне місце займав маховик, елементи підвіски та бак для палива. Замість звичного керма було встановлено штурвал як в літаках, що вимагало від водія певних навичок. Завдяки повністю прозорому даху салон автомобіля дуже швидко нагрівався.

Так вийшло, що оригінальна ідея, в якій використовувалось багато провідних інженерних технологій, створила багато проблем та не вирішених задач. Всього було створено лише кілька макетів у натуральну величину. Але, на жаль, точних геометричних даних чи технічних характеристик не зберіглося.

У 2017 році китайський стартап Beijing Lingyun Intelligent Technology Co. намагався створити свій двоколісний автомобіль з системою самобалансування, беручи за основу концепт Ford Gyron. Транспортний засіб під назвою Lingyun 1703 пересувається на електротязі, а також був позбавлений керма і педалей, адже позиціонується як автономний [8].

Одномісна капсула нагадує щось середнє між автомобілем і мотоциклом: у неї повністю закритий кузов з двома бічними дверима і два колеса. Довжина транспортного засобу становить три метри, ширина – один метр. Під сидінням встановлений гіроскоп, що дозволяє машині зберігати рівновагу, а під дверима знаходяться висувні коліщатка, що підтримують її під час стоянки. Зовнішній вигляд зображено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд транспортного засобу Lingyun 1703 [8]

Апарат може розганятися до 100 км/год і проїжджати близько сотні кілометрів на одній зарядці батареї. У салоні немає традиційних пристроїв керування: перед водієм знаходиться лише великий екран. За останніми даними, концепт і досі знаходиться у розробці.

Оскільки масове використання автотранспортних засобів заснованих на гіроскопічному ефекті, таких як Ford Gyrón та Lingyun 1703 поки не можливе – є сенс розглянути існуючі рішення систем та технологій в основі яких лежить використання гіроскопу, як стабілізуючої системи.

Найпопулярнішою нині технологією яка використовує гіроскопічний ефект є гіроскутер. Гіроскутер – двоколісний самобалансуючий скутер – персональний транспортний засіб у вигляді перекладки з колесами по бокам. Приклад гіроскутера наведено на рисунку 2.3.

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		12



Рисунок 2.3 – Типовий вигляд гіроскутера [9]

Структура всіх гіроскутерів майже однакова. Різниця може бути лише в додаткових функціях, як от освітлення, Bluetooth чи звукові колонки. В цілому гіроскутер складається із плати з сенсорами, материнської плати з процесором, мотор-коліс, акумулятора та металевого корпусу.

Акумулятор є джерелом електроенергії для мотор-коліс. У залежності від виду гіроскутера, використовують ємність акумуляторів від 3 Аг до 4,4 Аг.

Електромотори в гіроскутері – це мотор-колеса. Їх використання зумовлене відсутністю необхідності використання додаткових елементів для передачі руху від двигуна до коліс.

У пристрої може бути кілька плат. Вони зазвичай призначені для контролю над платформою, для контролю над мотор-колесами, тощо. Зазвичай, задля економії ставлять лише 1-2 плати. Це значно впливає як на ціну – такі гіроскутери дуже дешеві, так і на якість самого гіроскутера, адже він швидко виходить з ладу. Структуру гіроскутера зображено на рисунку 2.4.

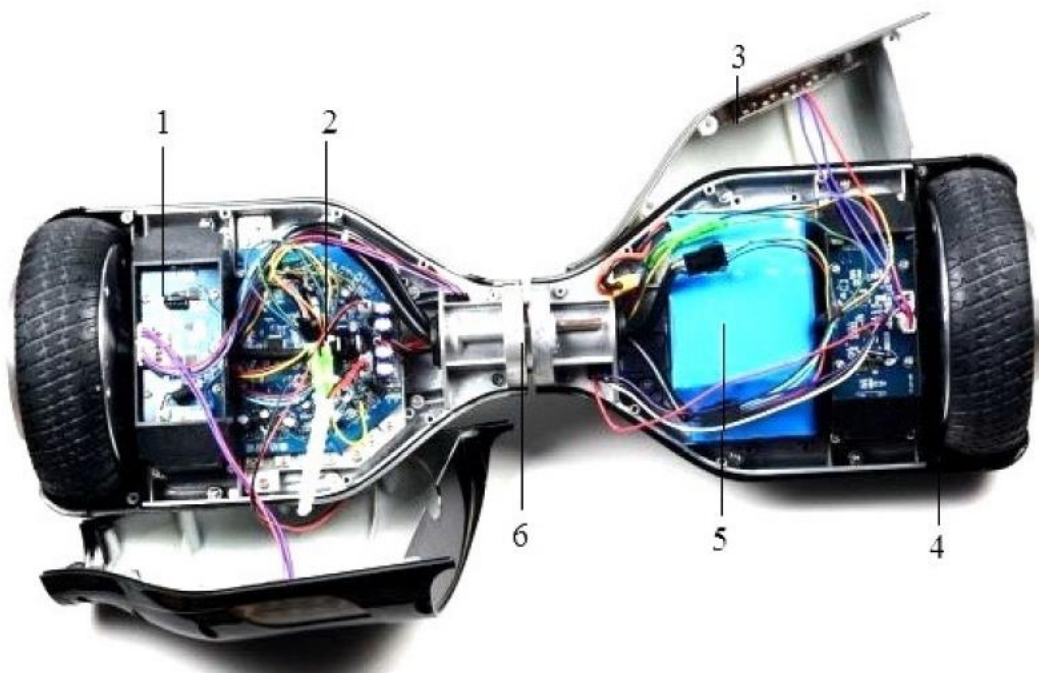


Рисунок 2.4 – Типова структура гіроскутера [10]:

- 1 – плата гіроскутера з сенсорами;
- 2 – материнська плата з процесором; 3 – корпус;
- 4 – мотор-колесо; 5 – акумулятор; 6 – металева основа

Набір гіроскопічних датчиків відслідковує положення людини на гіроплатформі та передає сигнал на плати керування. Процесор в свою чергу обробляє ці дані та дає сигнал на двигуни прискоритись чи сповільнитись, завдяки чому користувач може керувати такою платформою. А також, через те що датчики дуже чутливі, система фіксує всі коливання та балансує платформу гіроскутера так, щоб користувач завжди лишався в рівновазі.

Наймовірно корисним гіроскопічний ефект є на морі, для усунення хитавиці. Бортова хитавиця ставить під загрозу стійкість судна на морі або небажано впливає на нього. Також хитавиця призводить до поганого самопочуття деяких пасажирів на борту судна. Для механічного демпфірування використовують різні системи стабілізації. Для великих суден використовують систему заспокійливих цистерн з гіроскопічними насосами, а для яхт, розміром до 70 м, використовують звичайний гіроскопічний стабілізатор.

Система із заспокійливими цистернами представляє собою цистерни, що

вбудовані в корпус судна. Принцип їх дії заснований на тому, що бортова хитавиця демпфується власними коливаннями маси рідини на борту. Розроблені Фрамом заспокійливі цистерни складаються з двох бортових диптанків, які внизу (в днищі корабля) через переливний канал переходять в U-подібну цистерну (рисунок 2.5).

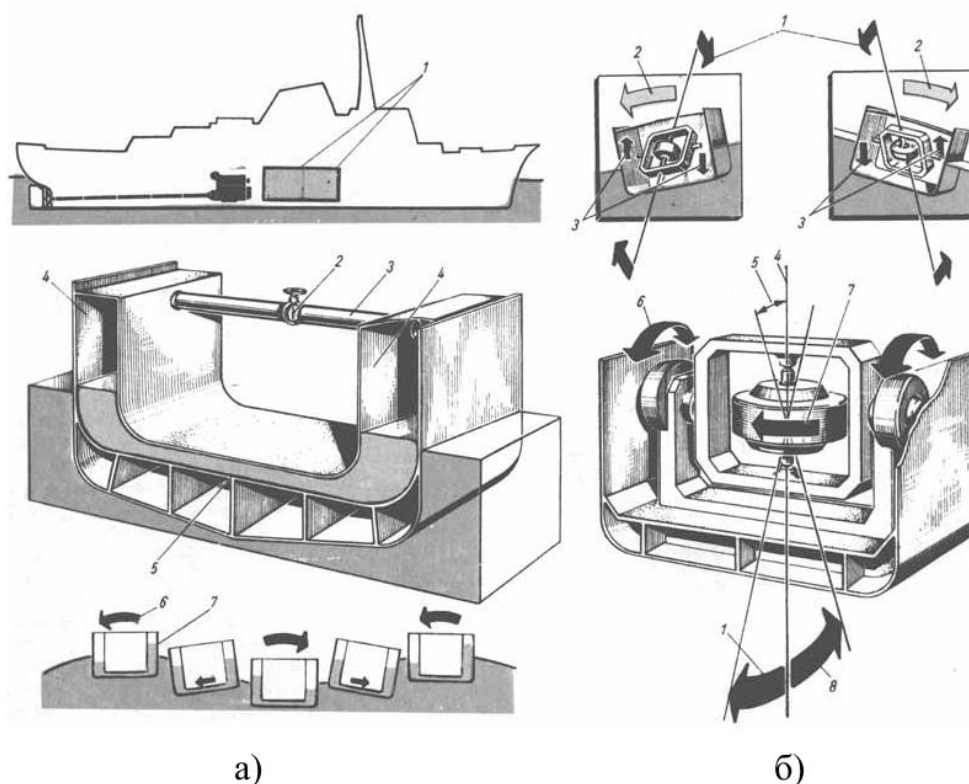


Рисунок 2.5 – Судно зі стабілізацією та гіроскоп [11]:

- а) Судно з заспокійливими цистернами: 1 – заспокійливі цистерни;
 2 – повітряний вентиль; 3 – з'єднувальний повітряний канал; 4 – бортові диптанки;
 5 – переливний канал; 6 – бортова хитавиця судна; 7 – вода в цистерні.
- б) Судновий гіроскоп: 1 – момент гіроскопа; 2 – момент крена;
 3 – пара сил в хитному рамковому підшипнику; 4 – вісь обертання гіроскопа;
 5 – прецесія; 6 – гальмівний момент рамкового підшипника;
 7 – напрямок повороту гіроскопа (кутова швидкість); 8 – швидкість прецесії

Обидві цистерни через повітряний з'єднувальний канал зверху з'єднані з повітряним вентилем. Цистерни заповняють до певного рівня водою або паливом. При бортовій хитавиці судна рідина переливається по каналу туди і назад. Саме так

отримується зсув по фазі в межах 90° , тобто рідина протидіє бортовий хитавиці судна. Принцип дії різних заспокійливих цистерн Фрама однаковий. Найбільший демпфуючий ефект таких цистерн на бортову качку становить близько 50%, тобто бортова хитавиця судна з заспокійливими цистернами зменшується в два рази. Внаслідок стабілізації судна зменшується його прагнення встати перпендикулярно до схилу хвилі. Але тоді зменшується і стабілізуючий момент води в цистернах, тому в заспокійливі цистерни вбудовують насоси з гіроскопічним управлінням. Принцип дії гіроскопа як заспокійливого демпфуючого засобу заснований на тому, що у бортового гіроскопа з моментом інерції мас J_p і кутовою швидкістю ω при доданому моменті M вісь гіроскопа відхиляється перпендикулярно до площини моменту з кутовою швидкістю ω_p , що називається прецесією.

Для досягнення демпфуючого впливу гіроскоп розташовують таким чином, щоб він міг коливатися перпендикулярно бортовий хитавиці, вздовж площини судна. Бортова хитавиця судна нейтралізується тільки тоді, коли коливання прецесії гіроскопа демпфуються гальмами, вбудованими в рамкові підшипники, в іншому випадку відбувалося б лише збільшення періоду качки. Період коливань гіроскопа при різниці фаз 90° тільки незначно відхиляється від періоду коливань судна. Завдяки відповідному управлінню гіроскоп постійно протидіє бортовий хитавиці судна і істотно демпфує кути крену.

Для суден менше ніж 70 м використовують не таку складну систему стабілізації на воді. Для цього використовують лише один гіроскопічний стабілізатор. Приклад гіростабілізатора який використовують на яхтах зображено на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Гіростабілізатор SEAKEEPER 5 [12]

У середині сфери у вакуумі обертається маховик зі швидкістю до 10700 об/хв. Коли починається хитавиця, гіроскоп нахиляється вперед і назад, утворюючи потужний гіроскопічний момент, з лівого на правий борт, що протидіє крену судна. Вакуумна сфера дозволяє маховику обертатися в три рази швидше, на 2/3 скорочуючи вагу маховика і на половину вимоги щодо електроживлення. Більше того, оскільки основні компоненти (підшипники і мотор) розміщені у вакуумі, вони назавжди ізольовані від впливу водного середовища, що забезпечує довготривале використання такого гіростабілізатора.

2.1 Висновки до розділу

У даному розділі було розглянуто технологічні рішення, в яких застосовується гіроскопічний ефект. Через те, що він широко застосовується у вирішенні проблем у багатьох сферах, використання даної властивості в розроблюваній транспортній платформі цілком обґрунтовано та забезпечить необхідний рівень стабілізації.

3 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

Структурна схема системи керування гіроскопічними транспортними платформами представлена на рисунку 3.1 та на кресленику ІА61.130БАК.005 Э1.

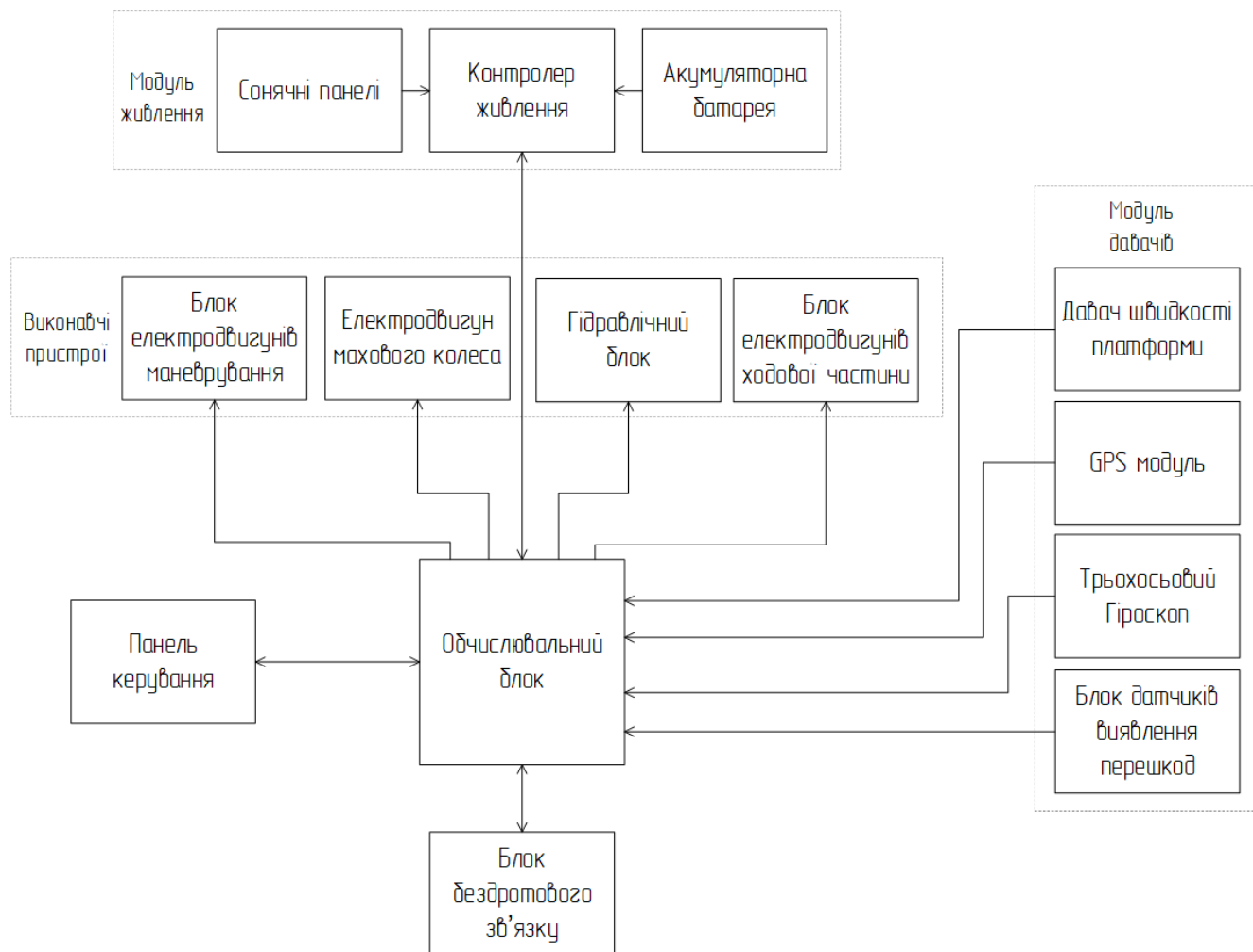


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи керування гіроскопічними транспортними платформами

Система складається з таких ключових елементів як: модуль живлення, блок датчиків, виконавчі пристрої, панель керування, блок бездротового зв'язку та обчислювальний блок.

У першу чергу, до уваги слід узяти модуль живлення. Він містить в собі акумуляторну батарею, сонячні панелі та контролер живлення. Сонячні панелі

покривають верхню частину корпусу та заряджають акумуляторну батарею. Вона, в свою чергу, забезпечує живленням всю транспортну платформу, а контролер живлення розподіляє енергію між всіма компонентами системи.

Модуль давачів містить в собі давач швидкості платформи, GPS модуль, трьохосьовий гіроскоп та блок датчиків виявлення перешкод. GPS модуль забезпечує визначення точного позиціонування платформи у просторі задля відслідковування руху за маршрутом. Давачі швидкості дозволяють визначити швидкість переміщення платформи. Трьохосьовий гіроскоп слугує показником положення транспортної платформи відносно горизонтальної площини. Блок датчиків виявлення перешкод дозволяє транспортній платформі отримувати інформацію про навколишнє середовище, а саме відстань до об'єктів, їх розміри, ідентифікацію (дорожні знаки, сигнали світлофора). Також датчики виявляють пішоходів, велосипедистів та інших учасників дорожнього руху задля безпечного пересування. Весь цей масив даних, що збирають датчики, передається для обробки обчислювальному блоку.

Оскільки платформа автономна, їй необхідний потужний обчислювальний блок, який буде в змозі обробляти велику кількість даних та керувати транспортним засобом без втручання оператора. Система автопілотування буде слідувати вказаному маршруту, який можна передавати та коригувати за допомогою блоку бездротового зв'язку, який забезпечить повний дистанційний контроль над платформою.

Автопілот не здатен передбачити та запобігти усім можливим ситуаціям, тому системою передбачено керування транспортним засобом з панелі керування, яка матиме екран для відображення всіх необхідних даних із давачів, а також засоби ручним керуванням платформою.

Основне функціонування платформи забезпечують виконавчі пристрої, які приводять її в рух. Блок електродвигунів маневрування забезпечує повороти платформи, точність яких забезпечують крокові двигуни, що розташовані на рухомих основах. За необхідності платформа може змінювати свою висоту за допомогою гідравлічного блоку, що розташований в телескопічних трубах-опорах. Це дозволить платформі розминутися з такими ж іншими транспортними засобами, просто

піднявшись на рівень вище, або ж навпаки «присісти» задля того, щоб проїхати під мостом. Стабільне горизонтальне положення платформи забезпечить махове колесо, що буде виконувати роль гіростабілізатора, вирівнюючи положення платформи за допомогою виникаючого гіроскопічного ефекту при зміні кута нахилу маховика, розташованого в центрі мас транспортного засобу. Приводити всю цю величезну машину в рух будуть мотор-колеса, які зроблять конструювання та технічний огляд двигунів набагато простіше, адже не буде потреби передавати крутний момент на колісний вал. Усі необхідні компоненти вже розташовані всередині мотор-колеса.

3.1 Висновки до розділу

У даному розділі була описана загальна структура системи, окремі її частини та їх призначення. Система включає у себе головний обчислювальний блок, до якого під'єднані всі інші модулі платформи. Перераховані вище елементи мають забезпечити необхідну працездатність системи керування гіроскопічними транспортними платформами.

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
						20
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		

4 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ

Функціональна схема системи керування гіроскопічними транспортними платформами побудована на базі структурної схеми (рисунок 3.1) та представлена на рисунку 4.1 та на кресленику ІА61.130БАК.005 Э2.

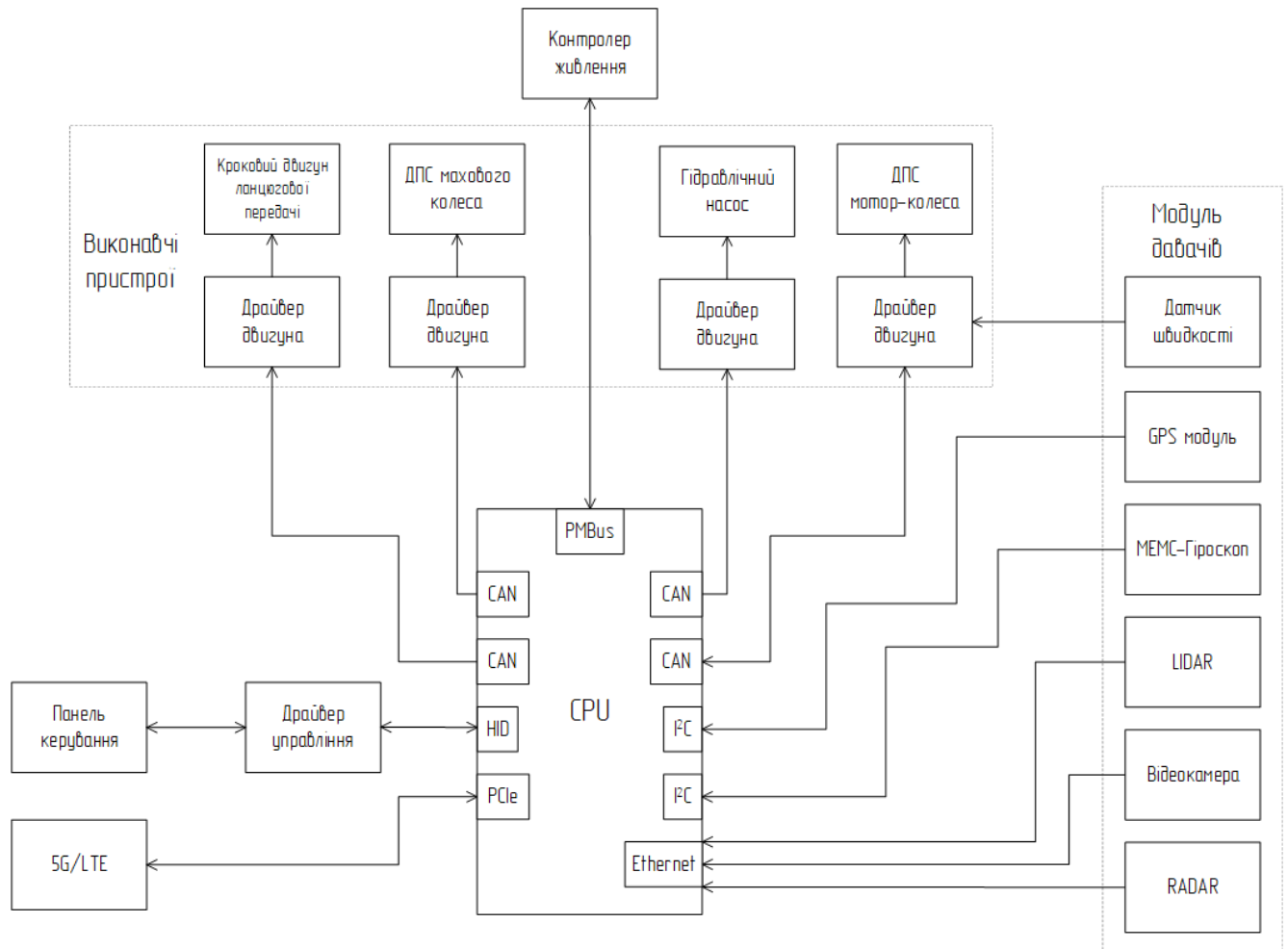


Рисунок 4.1 – Функціональна схема системи керування гіроскопічними транспортними платформами

Контролер живлення ефективно забезпечує всю систему необхідною для функціонування системи енергією та взаємодіє з центральним процесором через шину PMBus (Power Management Bus) – спрощений варіант шини SMBus (System Management Bus), яка орієнтована на цифрове управління джерелом живлення. Як і альтернативний SMBus, PMBus доволі повільний двопровідний протокол зв'язку,

заснований на протоколі I²C. Цей гнучкий і дуже універсальний стандарт дозволяє спілкуватися між пристроями, заснованими як на аналогових, так і на цифрових технологіях, та забезпечує справжню сумісність, що зменшує складність проектування.

Вищезгаданий протокол I²C (Inter-Integrated Circuit) – послідовна асиметрична шина для зв'язку між інтегральними схемами. Використовується для з'єднання низькошвидкісних периферійних компонентів з материнською платою. У цій системі ця шина використовується для передачі даних із таких датчиків, як GPS модуль і MEMC-гіроскоп. GPS модуль в купі з 5G/LTE модулем зв'язку використовується для точного позиціонування платформи на площині земної поверхні, а MEMC-гіроскоп – у просторі.

Модуль GPS обчислює власне місцезнаходження, вимірюючи час проходження сигналу від GPS-супутників. Кожен супутник постійно надсилає повідомлення, в якому міститься інформація про час, точку орбіти супутника, з якої було надіслано повідомлення, та загальний стан системи й приблизні дані орбіт усіх інших супутників системи GPS. Ці сигнали розповсюджуються зі швидкістю світла в космосі, і з трохи меншою швидкістю — в атмосфері. Приймач визначає час затримки в надходженні сигналу та обчислює відстань до супутників, виходячи з якої визначає своє місцерозташування. Отримані координати перетворюються в наочну форму (широта та довгота чи положення на карті) та відображаються оператору або надаються в обробку обчислювальному блоку. Теоретично, для визначення власних координат достатньо визначити відстань до трьох супутників. Однак для обчислення положення необхідно знати час із високою точністю. Щоб усунути потребу у високоточному годиннику, отримують інформацію з чотирьох чи більше супутників, тобто GPS-приймач використовує мінімум чотири параметри для обчислення чотирьох невідомих: x, y, z та t. Окрім координат, сучасні GPS модулі також здатні розраховувати курс та швидкість власного руху на площині.

MEMC (мікроелектромеханічна система)-гіроскоп являє собою мікросхему, що об'єднує в собі мікроелектронні та мікромеханічні компоненти для позиціонування платформи у просторі. Отриманий від датчика сигнал посилюється,

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		22

демодулюється і фільтрується, даючи в результаті напругу. Оцифровується ж даний сигнал за допомогою вбудованого в плату 16-бітного АЦП, що дозволяє центральному процесору обробити відповідні дані.

5G/LTE модуль взаємодіє з процесором через послідовну шину PCIe (Peripheral Component Interconnect Express), що забезпечує високошвидкісну передачу даних. Використовується цей модуль задля зв'язку та обміну інформації між платформою та операторами транспортного депо через мережу Internet, а також співпрацює з GPS модулем задля отримання більш точної інформації про місцезнаходження платформи. Оператор має можливість змінити маршрут транспортного засобу, надіславши певні команди і/або маршрут заданій платформі. Також завдяки віддаленому зв'язку оператор може прийняти віддалене керування платформою або провести первинну діагностику несправностей.

LIDAR (Light Detection and Ranging), RADAR (radio detection and ranging) та відеокамери – це своєрідні органи чуття транспортної платформи. Вони забезпечують оглядовість системи задля безпечного пересування платформи та оточуючих. З процесором взаємодіють через протокол передачі даних Ethernet. Приклад роботи вказаних датчиків у випадку автомобіля представлено на рисунку 4.2.



Рисунок 4.2 – Розпізнавання перешкод датчиками [13]

LIDAR – технологія отримання та обробки інформації за допомогою активних оптичних систем. У якості пристрою являє собою далекомір. Використовується для сканування навколишнього світу за допомогою лазера та генерує модель об’єктів, що знаходяться навколо пристрою. Приклад карти об’єктів, де колір відповідає відстані від датчика, представлений на рисунку 4.3.

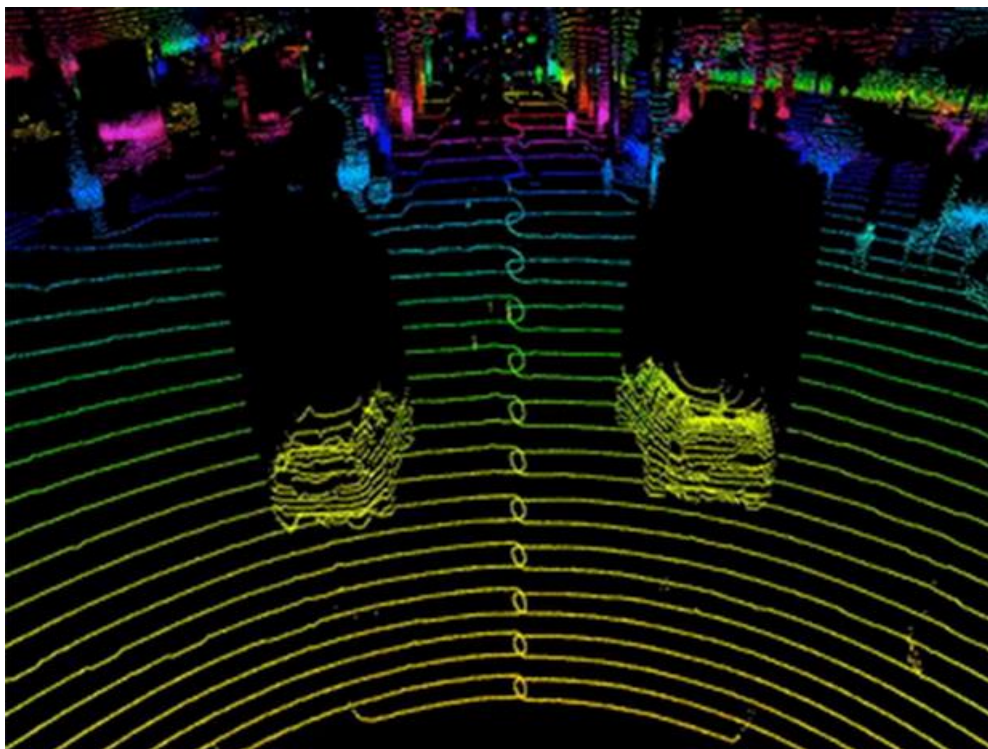


Рисунок 4.3 – Розпізнавання перешкод LIDAR-ом [14]

RADAR, на відміну від LIDAR’у, у своїй роботі використовує випромінювання радіохвиль та дозволяє визначити не тільки відстань до об’єкта, а й його швидкість. Проте обидва датчики залежать від погодних умов – під час дощу покази можуть бути отримані з меншою точністю.

Відеокамери, за допомогою комп’ютерного зору, дозволяють розпізнавати об’єкти оточення, на що не здатні попередні датчики виявлення перешкод. Наприклад: дорожні знаки, розмітку, сигнали світлофора тощо.

У кожного з датчиків є свої обмеження, тому найбільш повні дані можна отримати завдяки їх спільній роботі. Комбінація роботи вищезазначених датчиків

дозволяє забезпечити отримати зображення, приклад якого наведено на рисунку 4.4

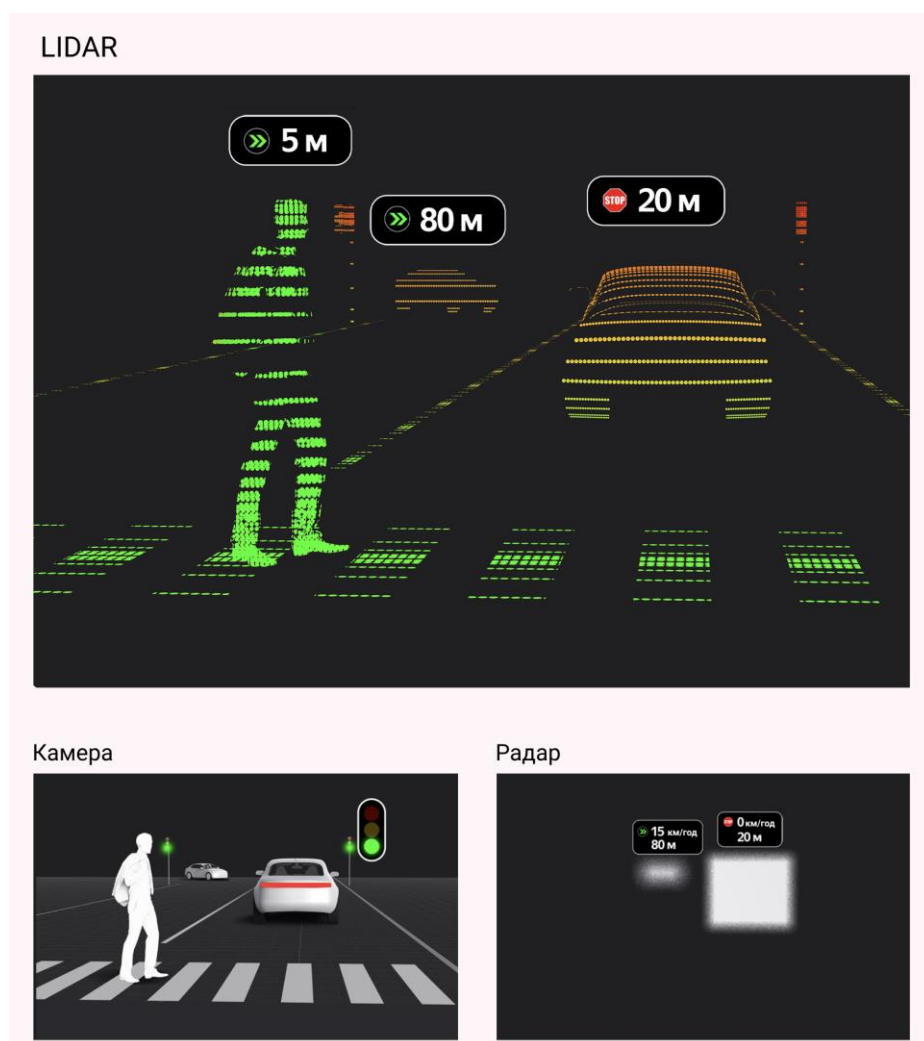


Рисунок 4.4 – Бачення світу датчиками [15]

Рух платформи забезпечують різноманітні електродвигуни. Управління виконавчими пристроями забезпечується за допомогою драйверів для кожного пристрою окремо. Драйвер двигуна – пристрій, який перетворює сигнали малої потужності від центрального процесора в струм, достатній для управління двигуном.

Взаємодія з процесором відбувається за допомогою CAN (Controller Area Network) шини. Це послідовна шина, що забезпечує зв'язок між контролерами виконавчих пристроїв та центральним процесором.

Основним компонентом є телескопічні опори, які кріпляться на рухомі основи, що розташовані на нижній стороні транспортної платформи. В середині кожної опори міститься гідравлічна система, за допомогою яких ці опори й змінюють

свій розмір. Ця система містить в собі такі компоненти: електродвигун, насос для подачі рідини, резервуар для зберігання рідини (гідравлічного масла) та поршні. Двигун насосу створює тиск та подає рідину в систему, чим здійснює зміну висоти платформи.

Рухомі основи крутяться за рахунок крокових двигунів ланцюгової передачі. Крокові двигуни це такі ж електродвигуни, але їх ротори не безперервно обертаються, а виконують обертальний рух щоразу на заданий кут. Керування ж відбувається за рахунок ланцюгової передачі, яка через зубчаті колеса та замкнутий ланцюг передає обертовий рух між валами електродвигуна та опори, що кріпиться до основи. Це дозволяє точно повернути рухому основу навколо своєї осі задля здійснення маневру повороту.

До нижньої частини опори кріпиться шасі, що являє собою поздовжньо здвоєні мотор-колеса, що забезпечують пересування платформи по дорозі. Мотор-колесо – це комплексний агрегат, в якому об'єднані безпосередньо колесо, електродвигун, трансмісія та гальмівна система. Існує два режими роботи мотор-колеса – тяговий та генераторний. У тяговому режимі обертання передається з валу якоря електродвигуна, що працює в руховому режимі, через редуктор до внутрішнього зубчатого вінця ведучого колеса; в генераторному режимі, використовуваному для електричного гальмування, електродвигун переходить в генераторний режим роботи, а електроенергія повертається в електричну мережу або застосовується для зарядки акумуляторів (рекуперативного гальмування).

Стабільне положення зберігається за рахунок махового колеса, електродвигуни якого й підтримують необхідну кількість обертів та забезпечують нахили осі обертання на градус, необхідний для стабілізації системи.

Панель керування взаємодіє з процесором через USB (Universal Serial Bus) та HID (Human Interface Device), адже це пристрій вводу-виводу, призначений для керування транспортною платформою машиністом. Для їх взаємодії буде необхідно розробити спеціальне програмне забезпечення, яке забезпечить інтуїтивно зрозумілі дані про роботу транспортного засобу, що полегшить машиністу керування платформою.

Самим головним елементом системи, її мозком, є обчислювальний блок – центральний процесор. Саме він забезпечує керування всією системою, адже обробляє дані та сигнали з усіх датчиків та надає інструкції виконавчим пристроям, слідкує за станом систем та контролює основні функціональні компоненти транспортного засобу. Сам пристрій є друкованою платою з потужним центральним процесором, оперативною пам'яттю великого об'єму та достатньою кількістю інтерфейсів для підключення усіх складових системи. Велика потужність потребується задля забезпечення високої швидкості численних обчислень, що необхідні для бездоганної роботи платформи.

4.1 Висновки до розділу

У даному розділі було розглянуто більш детальну структуру функціональної схеми та процеси, що виникають між її складовими. Було описано необхідність та принцип роботи кожного компоненту, що дало змогу визначитися з вимогами до них. Отже, можна переходити до вибору окремих елементів системи.

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
						27
<i>Зм.</i>	<i>Ар-</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Лат</i>		

5 ВИБІР ОКРЕМИХ ЕЛЕМЕНТІВ

5.1 Ходова частина

Платформа може пересуватися за рахунок двигунів, що вбудовані безпосередньо в колеса, адже через телескопічні труби дуже складно передавати крутний момент. За приклад можна взяти технологію Michelin Active Wheel [16]. Це, по суті, звичайне колесо, що містить в собі пару електродвигунів. Один з них є двигуном постійного струму, що забезпечує пряму подачу потужності та рекуперативне гальмування. Інший електродвигун приводить в дію активну підвіску, що керує розподілом крутного моменту, тягою, маневрами повороту, нахилом, рухом та демпфером підвіски для цього колеса. Це дозволяє позбутися механічної підвіски і в результаті, обладнаному такими колесами транспортному засобу більше не потрібна коробка передач, зчеплення, вал трансмісії тощо. З чого складається це мотор-колесо, можна побачити на рисунку 5.1.

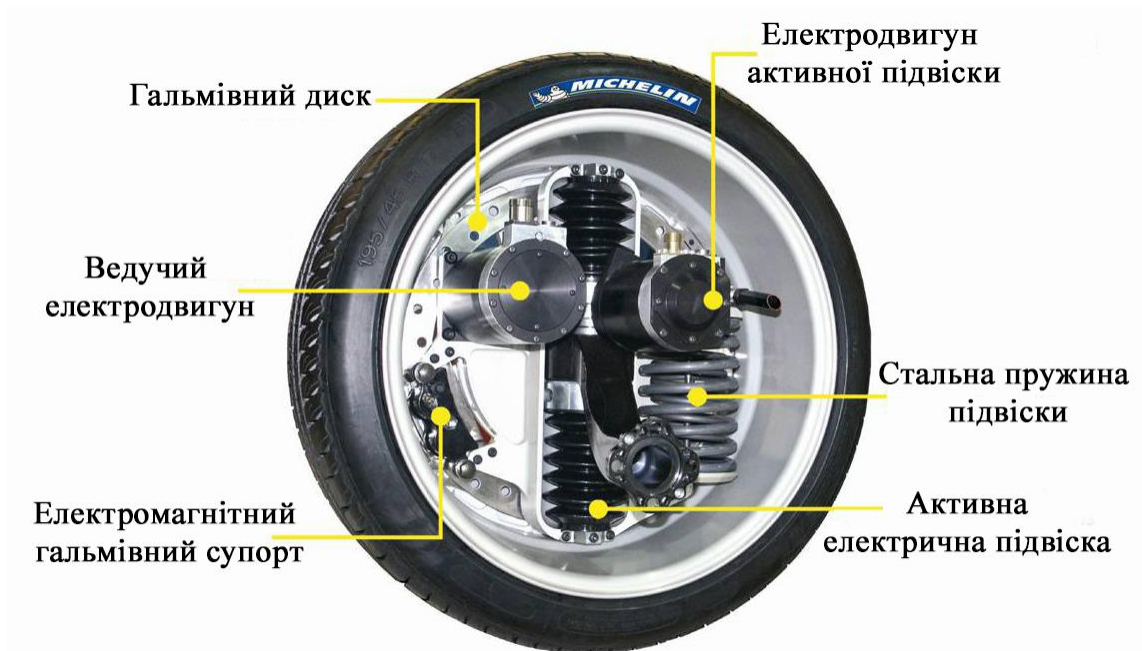


Рисунок 5.1 – Компоненти мотор-колеса Michelin Active Wheel [17]

Як і в будь-якому мотор-колесі, в цій системі передбачено датчик Холла, який виконує функцію давача швидкості обертання. Це дозволяє задавати швидкість на

кожне колесо окремо задля підвищення здатності маневрування.

На базі цієї технології необхідно буде розробити свій аналог задля задоволення потреб у потужності та інших характеристиках.

5.2 Двигун постійного струму

Вага повністю завантаженої платформи складає 25 тон. Діаметр колеса складає 1,016 метрів. При середній швидкості руху в 50 км/год кожне колесо виконує один повний оберт приблизно за 4.35 хвилин, тобто 0.23 об/хв. Як відомо, 1 об/хв $= \frac{2\pi}{60}$ рад/с. Таким чином частота обертання колеса складе 27.34 рад/с.

Розрахунок необхідної потужності електродвигуна. Потужність у загальному випадку дорівнює потужності технологічного процесу, для виконання якого і створюється привід. Потужність на вихідному валу приводу можна розрахувати за формулою

$$P_D = M_H \omega, \quad (5.1)$$

де P_D – потужність на вихідному валу приводу;

M_H – момент на вихідному валу приводу;

ω – кутова швидкість на вихідному валу приводу, с^{-1} .

Кутова швидкість $\omega = \frac{n\pi}{30}$, n – частота обертання робочого органу, об/хв. Момент на вихідному валу приводу можна розрахувати за формулою:

$$M_H = F_t R, \quad (5.2)$$

де F_t – сила тяги, Н; $F_t = \mu F_n$;

μ – коефіцієнт тертя;

F_n – навантаження, $F_n = Mg$;

M – маса платформи, кг;

R – радіус колеса.

Нехай $\mu = 0.02$ – коефіцієнт тертя підшипника на валу. На основі рівнянь (5.1) та (5.2) розрахуємо необхідну потужність двигуна:

$$F_n = 25\,000 \cdot 9.81 = 245\,250 \text{ Н.} \quad (5.3)$$

$$F_t = 0.02 \cdot 245\,250 = 4\,905 \text{ Н} \quad (5.4)$$

$$M_H = 4\,905 \cdot 0.508 = 2\,491,74 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (5.5)$$

$$P_D = 2\,491,74 \cdot 27.34 \approx 68\,125 \text{ Вт.} \quad (5.6)$$

Необхідна потужність двигуна складає $68\,125 \text{ Вт} = 68,125 \text{ кВт}$.

Візьмемо 4 мотор-колеса та розташуємо їх попарно на кожну вісь. Це дозволить розділити необхідну потужність на 4 рушії. В результаті на 1 двигун необхідна потужність складе $\frac{P_D}{4} = \frac{68,125}{4} = 17,0313 \text{ кВт}$.

Такий потужності задовольняє двигун НРМ-20KW, характеристики якого представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Характеристики двигуна НРМ-20KW [18]

Р, кВт	U, В	I, А	н, об/хв	M _H , Н•м	J, кг•м ²	Маса, кг
20	96	230	3500	80	0.004	39

Для розроблення моделі об'єкту керування потрібно врахувати такі сталі:

- стала швидкості двигуна (стала зворотної ЕРС) K_e ;
- стала крутного моменту двигуна K_T .

$$K_e = \frac{V_{peak}}{\omega_{no-load}}, \quad (5.7)$$

$$K_T = \frac{30K_e}{\pi}, \quad (5.8)$$

де V_{peak} – пікова напруга, В;

$\omega_{no-load}$ – кількість обертів двигуна при холостому ході, об/хв.

За формулами (5.7) і (5.8), а також даними про ефективність роботи двигуна [19], розрахуємо необхідні константи:

$$K_e = \frac{95.83}{4060} = 0.0236, \quad (5.9)$$

$$K_T = \frac{30 \cdot 0.0236}{\pi} = 0.2254. \quad (5.10)$$

5.3 MEMС-гіроскоп

Для оцінки положення у просторі, обчислювальному блоку необхідно мати максимально точні дані з гіроскопу, адже саме від показів цього датчика залежить життя людей навколо та всередині платформи.

У якості гіроскопа було обрано інерційний модуль BNO055 виробника Adafruit [20], що зображений на рисунку 5.2.

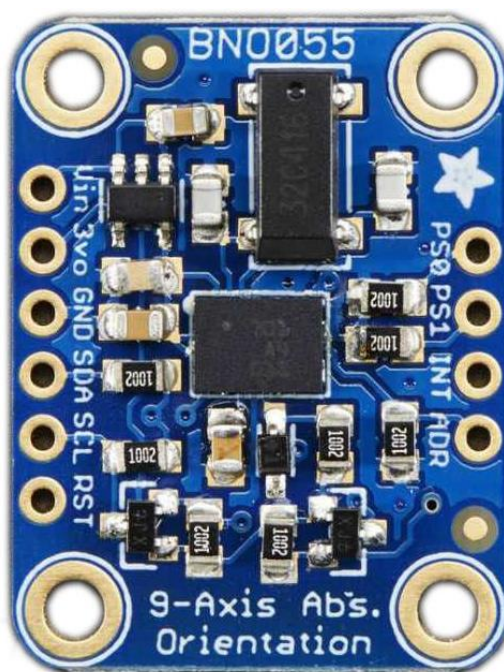


Рисунок 5.2 – Adafruit 9-DOF Absolute Orientation IMU BNO055 [20]

Не зважаючи на малий розмір, він забезпечує високу точність виміру у всіх

можливих 9 ступенях свободи. Істотною перевагою цього датчика є наявність вбудованого мікроконтролера з 32-бітним ядром ARM Cortex M0. Контролер отримує дані з датчиків – трьохосьового 14-бітного акселерометра, трьохосьового 16-бітного гіроскопа и трьохосьового магнітометра, обробляє і записує результати у внутрішні регістри, доступні для читання через стандартні послідовні інтерфейси. Таким чином, обчислювальному блоку не потрібно відволікатися на низькорівневі обчислення, пов'язані з сенсорами руху. А передача інформації через I²C забезпечить швидку реакцію системи керування.

5.4 GPS модуль

Для оцінки положення площині земної поверхні, обчислювальному блоку необхідно мати точні дані з модуля позиціонування GPS. Досягти високої точності даних можна за допомогою поєднання декількох технологій позиціонування, тобто не тільки GPS, а ще й ГЛОНАСС та Galileo. Забезпечити підтримку цих технологій може модуль визначення розташування SIM68R [21] від SIMCom Wireless Solutions. Сам модуль зображено на рисунку 5.3.



Рисунок 5.3 – SIM68R [21]

SIM68R – енергоефективний, мініатюрний ГЛОНАСС/GPS приймач нового покоління, побудований на базі чіпсета MediaTek. Володіючи передовими тактико-технічними характеристиками, це перший приймач, що одночасно має дуже мале енергоспоживання та велику чутливість в суміщеному режимі GPS + ГЛОНАСС.

Даний модуль орієнтований для роботи в складі широкого спектру пристроїв, в тому числі і автомобільного застосування, де потрібно функціонал навігаційного приймача. Новітнє програмне забезпечення модулів підтримує безліч вбудованих функцій, покликаних спростити роботу розробника. Серед них можна відзначити функції контролера геозон, контролера швидкості, лічильника пройденого шляху, а також видачу 3D-вектора швидкості і координат в системі ECEF. Тип корпусу LCC допускає як ручний монтаж, що може значно спростити розробку макету кінцевого пристрою, так і автоматичний монтаж на виробничих лініях. Приймач рекомендується до застосування в пристроях моніторингу автотранспорту, автомобільних охоронно-пошукових пристроях і терміналах ЕРА-ГЛОНАСС. Разом з усіма перевагами технічного характеру, цей модуль проводиться одним з найбільших поставальників OEM (Original equipment manufacturer) модулів в світі – компанією SIMCom Wireless Solutions, що традиційно користується популярністю за високу якість, низькі ціни, стислі терміни поставки, повну технічну документацію та оперативну технічну підтримку.

5.5 5G/LTE модуль

Задля забезпечення високошвидкісного зв'язку платформи з інфраструктурою необхідно мати модуль бездротового зв'язку. Оскільки зараз активно розвиваються технології 5-го покоління мобільних мереж, то доцільніше буде використати саме їх, адже в порівнянні з 4G, мережа 5G працює в 20 разів швидше [22]. Було обрано модуль зв'язку SIM8300G-M2 [23] від SIMCom Wireless Solutions, виконаний у форм-факторі M.2, що дозволить використати швидкісний інтерфейс PCIe для підключення. Він призначений для додатків, які потребують високої пропускної здатності передачі даних у різних умовах радіорозповсюдження. Завдяки унікальній комбінації продуктивності, безпеки та гнучкості, цей модуль ідеально підходить для багатьох застосувань. Сам модуль зображено на рисунку 5.4.

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		33



Рисунок 5.4 – SIM8300G-M2 [23]

Не зважаючи на те, що це саме 5G модуль, виробник передбачив підтримку мереж 4-го та 3-го покоління. У модулі задіяні самі передові на поточний момент технології, що забезпечують високу продуктивність, а підтримка широкого спектру основних частот дозволяє працювати в стільникових мережах по всьому світу.

Також у модуль бездротового зв'язку інтегровано невеличкий GPS модуль, що дозволить основному модулю позиціонування у просторі покращити свої покази за рахунок даних, отриманих із цього допоміжного пристрою. Оскільки модулі позиціонування та зв'язку представлені тим самим виробником – це забезпечить кращу взаємодію між компонентами та високу точність отримуваних даних.

5.6 Висновки до розділу

У даному розділі було розглянуто вибір та обґрунтування окремих елементів системи, їх характеристики та принципи роботи, проведено порівняльний аналіз та обрано пристрої, що повністю задовольняють вимогам системи. Основним принципом підбору елементів був вибір пристроїв, що дозволяють реалізувати концепт даної платформи.

6 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТУ КЕРУВАННЯ

6.1 Фізичні характеристики транспортної платформи

Гіроскопічну платформу можна розглянути, як зворотній маятник на колесах. Схематичне зображення платформи показано на рисунку 6.1. Фізичні параметри платформи наведені у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Характеристики транспортної платформи

$g = 9.81$	Прискорення вільного падіння, м/с^2
$m = 80$	Вага колеса, кг
$R = 0.508$	Радіус колеса, м
$J_w = \frac{mR^2}{2}$	Момент інерції колеса, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$
$M = 25\,000$	Вага тіла, кг
$W = 6$	Ширина платформи, м
$D = 9.6$	Довжина платформи, м
$H = 9$	Висота тіла, м
$l = 0.9H$	Відстань від центру маси до осі колеса, м
$J_\psi = \frac{ML^2}{3}$	Момент інерції нахилу платформи, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$
$J_\phi = \frac{M(W^2+D^2)}{12}$	Момент інерції напрямку руху платформи, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$
$J_m = 4 \cdot 10^{-3}$	Момент інерції двигуна постійного струму, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$
$R_m = 0.05$	Опір двигуна постійного струму, Ом
$K_e = 0.0236$	Стала, розрахована в формулі (5.9), $\text{В}\cdot\text{с/рад}$
$K_T = 0.2254$	Стала, розрахована в формулі (5.10), $\text{Н}\cdot\text{м/А}$
$n = 1$	Зубчаста передача
$f_m = 0.0022$	Коефіцієнт тертя між корпусом і двигуном
$f_w = 0.65$	Коефіцієнт тертя кочення

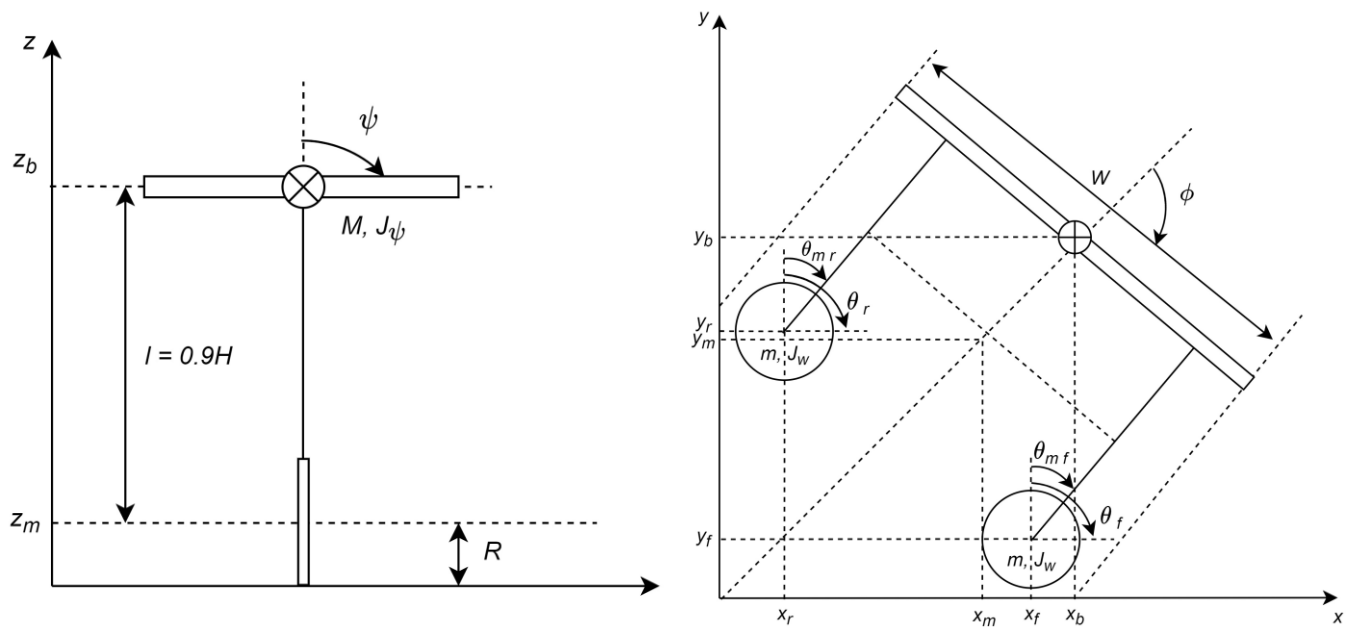


Рисунок 6.1 – Вид на платформу спереду та збоку

6.2 Рівняння руху транспортної платформи

Рівняння руху платформи буде отримано методом Лагранжа. Якщо напрямок платформи є позитивним напрямком осі x при $t = 0$, кожна координата задається наступним чином:

$$(\theta, \phi) = \left(\frac{1}{2}(\theta_f + \theta_r) \quad \frac{R}{W}(\theta_r - \theta_f) \right), \quad (6.1)$$

$$(x_m, y_m, z_m) = \left(\int \dot{x}_m dt, \int \dot{y}_m dt, R \right), \quad (\dot{x}_m, \dot{y}_m) = (R\dot{\theta} \cos \phi \quad R\dot{\theta} \sin \phi), \quad (6.2)$$

$$(x_f, y_f, z_f) = \left(x_m - \frac{W}{2} \sin \phi, y_m + \frac{W}{2} \cos \phi, z_m \right), \quad (6.3)$$

$$(x_r, y_r, z_r) = \left(x_m + \frac{W}{2} \sin \phi, y_m - \frac{W}{2} \cos \phi, z_m \right), \quad (6.4)$$

$$(x_b, y_b, z_b) = (x_m + l \sin \psi \cos \phi, y_m + l \sin \psi \cos \phi, z_m + l \cos \psi). \quad (6.5)$$

Поступальна кінетична енергія T_1 , кінетична енергія обертання T_2 , потенційна енергія U :

$$T_1 = \frac{1}{2} \left(m(\dot{x}_f^2 + \dot{y}_f^2 + \dot{z}_f^2) + m(\dot{x}_r^2 + \dot{y}_r^2 + \dot{z}_r^2) + M(\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2 + \dot{z}_b^2) \right), \quad (6.6)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \left(J_w \dot{\theta}_f^2 + J_w \dot{\theta}_r^2 + J_\psi \dot{\psi}^2 + J_\phi \dot{\phi}^2 + n^2 J_m \left((\dot{\theta}_f - \dot{\psi})^2 + (\dot{\theta}_r - \dot{\psi})^2 \right) \right), \quad (6.7)$$

$$U = mgz_f + mgz_r + Mgz_b. \quad (6.8)$$

П'ятий член у формулі (6.7) – кінетична енергія обертання якоря в передньому та задньому двигунах постійного струму.

Лагранжів L має такий вигляд:

$$L = T_1 + T_2 - U. \quad (6.9)$$

У якості узагальнених координат використано такі змінні:

θ , – середній кут переднього та заднього колеса;

ψ , – кут нахилу платформи;

ϕ , – кут напрямку руху.

Маємо такі рівняння Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = F_\theta, \quad (6.10)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi} = F_\psi, \quad (6.11)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} = F_\phi. \quad (6.12)$$

Диференціюючи рівняння (6.10-6.12), було отримано наступне:

$$[(2m + M)R^2 + 2J_w + 2n^2 J_m] \ddot{\theta} + (MLR \cos \psi - 2n^2 J_m) \ddot{\psi} - MLR \dot{\psi}^2 \sin \psi = F_\theta, \quad (6.13)$$

$$(MLR \cos \psi - 2n^2 J_m) \ddot{\theta} + (ML^2 + J_\psi + 2n^2 J_m) \ddot{\psi} - MgL \sin \psi - ML^2 \dot{\phi}^2 \sin \psi \cos \psi = F_\psi, \quad (6.14)$$

$$\left[\frac{1}{2} m W^2 + J_\phi \frac{W^2}{2R^2} (J_w + n^2 J_m) + ML^2 \sin^2 \psi \right] \ddot{\phi} + 2ML^2 \dot{\psi} \dot{\phi} \sin \psi \cos \psi = F_\phi. \quad (6.15)$$

Враховуючи крутний момент двигуна постійного струму та в'язке тертя, узагальнені сили задаються наступним чином:

$$(F_\theta, F_\psi, F_\phi) = \left(F_f + F_r, F_\psi, \frac{W}{2R} (F_r - F_f) \right), \quad (6.16)$$

$$F_f = nK_T I_f + f_m(\dot{\psi} - \dot{\theta}_f) - f_w \dot{\theta}_f, \quad (6.17)$$

$$F_r = nK_T I_r + f_m(\dot{\psi} - \dot{\theta}_r) - f_w \dot{\theta}_r, \quad (6.18)$$

$$F_\psi = -nK_t(I_f - I_r) - f_m((\dot{\psi} - \dot{\theta}_f) + (\dot{\psi} - \dot{\theta}_r)), \quad (6.19)$$

де $I_{f,b}$ — струм двигуна постійного струму, А.

Для керування двигуном постійного струму буде застосована широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), а не струм. Тому потрібно оцінити співвідношення струму та напруги за допомогою рівняння двигуна постійного струму. Якщо тертя всередині двигуна незначне, рівняння двигуна постійного струму, як правило, наступне:

$$L_m \dot{I}_{f,r} = v_{f,r} + K_e(\dot{\psi} - \dot{\theta}_{f,r}) - R_m I_{f,r} \quad (6.20)$$

Тут ми вважаємо, що індуктивність двигуна незначна і наближається до нуля. Тому струм дорівнює:

$$I_{f,r} = \frac{v_{f,r} + K_e(\dot{\psi} - \dot{\theta}_{f,r})}{R_m} \quad (6.21)$$

З рівняння (6.21) узагальнену силу можна виразити за допомогою напруги двигуна:

$$F_\theta = \alpha(v_f + v_r) - 2(\beta + f_w)\dot{\theta} + 2\beta\dot{\psi}, \quad (6.22)$$

$$F_\psi = -\alpha(v_f + v_r) + 2\beta\dot{\theta} - 2\beta\dot{\psi}, \quad (6.23)$$

$$F_{\phi} = \frac{W}{2R} \alpha (v_f + v_r) - \frac{W^2}{2R^2} (\beta + f_w) \dot{\phi}, \quad (6.24)$$

$$\alpha = \frac{nK_e}{R_m}, \quad (6.25)$$

$$\beta = \frac{nK_T K_e}{R_m} + f_m. \quad (6.26)$$

6.3 Перехід у простір станів

У просторі станів створюється модель динамічної системи, що включає набір змінних входу, виходу і стану, пов'язаних між собою диференціальними рівняннями першого порядку, які записуються в матричній формі. На відміну від опису у вигляді передавальної функції та інших методів частотної області, простір станів дозволяє працювати не тільки з лінійними системами і нульовими початковими умовами. Рівняння виду (6.27) називають рівнянням станів системи.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (6.27)$$

де x – вектор стану;

u – вектор керування;

y – вектор виходу;

A – матриця системи;

B – матриця керування;

C – матриця виходу;

D – матриця прямого зв'язку.

Отримаємо рівняння станів, лінеаризуючи рівняння руху в точці рівноваги платформи. Це означає, що границя наступна: $\psi \rightarrow 0$ ($\sin \psi \rightarrow \psi$, $\cos \psi \rightarrow 1$) та рівняння другого порядку, як $\dot{\psi}^2$, не враховується. Рівняння руху (6.13-6.15) наближаються до наступного:

$$[(2m + M)R^2 + 2J_w + 2n^2J_m]\ddot{\theta} + (MLR - 2n^2J_m)\ddot{\psi} = F_\theta, \quad (6.28)$$

$$(MLR - 2n^2J_m)\ddot{\theta} + (ML^2 + J_\psi + 2n^2J_m)\ddot{\psi} - MgL\psi = F_\psi, \quad (6.29)$$

$$\left[\frac{1}{2}mW^2 + J_\phi \frac{W^2}{2R^2} (J_w + n^2J_m) \right] \ddot{\phi} = F_\phi. \quad (6.30)$$

Рівняння (6.28) та рівняння (6.29) мають θ і ψ , рівняння (6.30) має лише ϕ .
Перші два рівняння можна виразити у формі таких матриць:

$$E \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} v_f \\ v_r \end{bmatrix}, \quad (6.31)$$

$$E = \begin{bmatrix} (2m + M)R^2 + 2J_w + 2n^2J_m & MLR - 2n^2J_m \\ MLR - 2n^2J_m & ML^2 + J_\psi + 2n^2J_m \end{bmatrix}, \quad (6.32)$$

$$F = 2 \begin{bmatrix} \beta + f_w & -\beta \\ -\beta & \beta \end{bmatrix}, \quad (6.33)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -MgL \end{bmatrix}, \quad (6.34)$$

$$H = \begin{bmatrix} \alpha & \alpha \\ -\alpha & -\alpha \end{bmatrix}. \quad (6.35)$$

Третє рівняння буде мати вигляд:

$$I\ddot{\phi} + J\dot{\phi} = K(v_r - v_f), \quad (6.36)$$

$$I = \frac{1}{2}mW^2 + J_\phi + \frac{W^2}{2R^2} (J_w + n^2J_m), \quad (6.37)$$

$$J = \frac{W^2}{2R^2} (\beta + f_w), \quad (6.38)$$

$$K = \frac{W}{2R} \alpha. \quad (6.39)$$

У результаті розрахунків було отримано два рівняння руху. Представимо їх у просторі станів. Тут розглядаються наступні змінні: x_1 та x_2 як стани системи, u як керування системи й y_1 та y_2 як виходи системи:

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
						40
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		

$$x_1 = \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad x_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} v_f \\ v_r \end{bmatrix}, \quad y_1 = \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}, \quad y_2 = \begin{bmatrix} \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (6.40)$$

Отже, можна отримати рівняння станів транспортної платформи з рівнянь (6.31) та (6.36).

1) Перше рівняння, з формули (6.31)

$$E \begin{bmatrix} \dot{x}_{1.3} \\ \dot{x}_{1.4} \end{bmatrix} + F \begin{bmatrix} x_{1.3} \\ x_{1.4} \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} x_{1.1} \\ x_{1.2} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (6.41)$$

Приведемо рівняння (6.41) до рівняння виду (6.27):

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1.1} \\ \dot{x}_{1.2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1.1} \\ x_{1.2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1.3} \\ x_{1.4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{x}_{1.3} \\ \dot{x}_{1.4} \end{bmatrix} = -E^{-1}G \begin{bmatrix} x_{1.1} \\ x_{1.2} \end{bmatrix} - E^{-1}F \begin{bmatrix} x_{1.3} \\ x_{1.4} \end{bmatrix} + E^{-1}H \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_{1.1} \\ y_{1.2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1.1} \\ x_{1.2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1.3} \\ x_{1.4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_{1.3} \\ y_{1.4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1.1} \\ x_{1.2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1.3} \\ x_{1.4} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6.42)$$

З рівняння (6.42) можемо виразити матриці рівнянь станів:

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -E^{-1} & G & -E^{-1} & F \end{bmatrix}, & B_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ E^{-1} & H \end{bmatrix}, \\ C_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, & D_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6.43)$$

2) Друге рівняння, з формули (6.36)

$$\begin{cases} \dot{\phi} = \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} = -\frac{J}{I}\dot{\phi} + \frac{K}{I}(v_r - v_f) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{x}_{2.1} = x_{2.2} \\ \dot{x}_{2.2} = -\frac{J}{I}x_{2.2} + \frac{K}{I}(u_2 - u_1) \\ y_{2.1} = x_{2.1} \\ y_{2.2} = x_{2.2} \end{cases} \quad (6.44)$$

Приведемо рівняння (6.44) до рівняння виду (6.27):

$$\begin{cases} \dot{x}_{2.1} = 0 \cdot x_{2.1} + 1 \cdot x_{2.2} + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 \\ \dot{x}_{2.2} = 0 \cdot x_{2.1} - \frac{J}{I}x_{2.2} - \frac{K}{I}u_1 + \frac{K}{I}u_2 \\ y_{2.1} = 1 \cdot x_{2.1} + 0 \cdot y_{2.2} + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 \\ y_{2.2} = 0 \cdot x_{2.1} + 1 \cdot y_{2.2} + 0 \cdot u_1 + 0 \cdot u_2 \end{cases} \quad (6.45)$$

З рівняння (6.45) можна виразити матриці рівнянь станів:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -J/I \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -K/I & K/I \end{bmatrix}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.46)$$

6.4 Розроблення моделі у MATLAB/Simulink

Загальна модель системи складається з двох підсистем: Plant та Controller. Підсистема Plant містить в собі модель платформи у просторі станів, отримання сигналів з датчиків гіроскопу та давача швидкості, осцилограф для відображення інформації про стан системи. Підсистема Controller відповідає за управління двигунами та буде розглянута в розділі 7.

Складаємо модель об'єкту керування в програмному пакеті MATLAB/Simulink.

Задля організації передачі даних між підсистемами, було створено шини Data та Ctl за допомогою компоненту Bus Editor. Шина Ctl містить один сигнал PWM, який складається з двох елементів – сигналів для переднього та заднього блоків двигунів. Шина Data містить два сигнали, що йдуть від енкодерів та гіроскопу. Сигнал від енкодерів відповідно також складається з двох елементів, тих самих, що й

сигнал PWM – для переднього та заднього блоків двигунів. Дані налаштування зберігаються у файлі `bus_data.mat`. У властивостях Simulink моделі в підменю Callbacks та в полі PreLoad Fcn буде вказано скрипт `preload.m`. Цей скрипт потрібний для завантаження даних про шини під час запуску моделі та має такий вигляд:

```
load('bus_data.mat')
```

Усі вказані вище характеристики платформи передано через MATLAB скрипт файл `params.m`, вміст якого наведено в додатку А. Математична модель та її приведення у простір станів наведені у MATLAB скрипті (файл `plant.m`), вміст якого наведено в додатку Б. Ці файли вказано в підменю Init Fcn для запуску їх виконання під час моделювання поведінки системи.

На вході підсистема Plant приймає керуючий сигнал ШІМ (PWM) від підсистеми Controller та переводить його в напругу. Поведінку системи задано через блоки просторів станів за допомогою матричних коефіцієнтів, розрахованих у рівняннях (6.43) та (6.46) у попередньому розділі. На виході буде отримано значення станів системи, які виведено на осцилограф задля спостереження за поведінкою системи, а також отримано покази датчиків системи. Значення кута ϕ буде переведено в градуси задля простішого розуміння та наочності показу результату регулювання рівноваги системи. Блок `get sensors` містить в собі MATLAB функцію, що отримує покази з датчиків гіроскопа та швидкості через простір станів. Функція `get sensors`:

```
function [enc_f, enc_r, gyro] = sensors(y, R, W)
enc_f = rad2deg(y(1) - W/R/2 * y(5) - y(2));
enc_r = rad2deg(y(1) + W/R/2 * y(5) - y(2));
gyro = rad2deg(y(4));
```

Після отримання показів датчиків їх значення буде передано системі керування Controller.

Схема підсистеми Plant наведена на рисунку 6.2, зображення моделі наведено у кресленику IA61.130БАК.005 Д1.

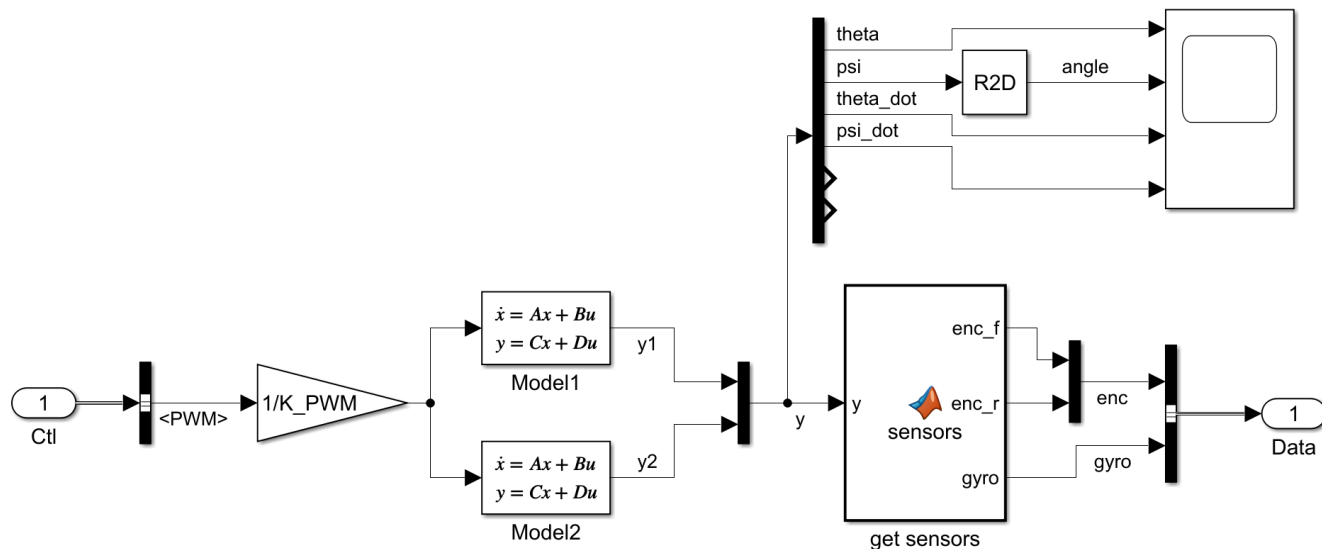


Рисунок 6.2 – Simulink модель транспортної платформи

6.5 Висновки до розділу

У даному розділі були проведені необхідні розрахунки задля розробки математичної моделі підсистеми гіроскопічної транспортної платформи. Розробка моделі дозволяє уникнути багатьох помилок при проектуванні систем, виявляючи їх ще до фізичної реалізації проекту.

7 СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

7.1 Синтез регулятора

Аналіз та синтез системи управління виконується у часовій, частотній областях та в просторі станів. У першому випадку загальноприйнятими вважаються інтегральні критерії мінімуму витрати енергії на управління:

$$J_1 = \int_{t_0}^{t_k} u(t) \cdot i(t) dt \rightarrow \min \quad (7.1)$$

і максимальної швидкодії:

$$J_2 = \int_{t_0}^{t_k} 1 dt = t_k - t_0 = T \rightarrow \min. \quad (7.2)$$

Розглянуті критерії для своєї реалізації вимагають джерела нескінченної малої та нескінченно великої потужності відповідно. Отже, виникає задача знаходження оптимального закону керування, який найкраще задовольняє ці два суперечливі критерії.

При вирішенні завдань оптимізації в просторі станів, коли лінійна стаціонарна система задана векторно-матричними рівняннями (6.27), доцільно представляти критерії (7.1) та (7.2) у вигляді квадратичних форм:

$$J_1 = \int_0^{\infty} x^T Q x dt \rightarrow \min, \quad (7.3)$$

$$J_2 = \int_0^{\infty} u^T R u dt \rightarrow \min, \quad (7.4)$$

та переходити до функціоналів:

$$J_1 = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u) dt \rightarrow \min, \quad (7.5)$$

$$J_2 = \int_0^{\infty} (y^T Q y + u^T R u + 2y^T N u) dt \rightarrow \min. \quad (7.6)$$

Закон управління u знаходиться у формі лінійного зворотного зв'язку по змінним стану x або виходу y , тобто

$$u = \pm Kx, \quad u = \pm Ky. \quad (7.7)$$

Таке управління мінімізує квадратичні критерії якості (7.5) та (7.6).

Тут Q та R – симетричні позитивно визначені матриці розміром $[n \times n]$ та $[m \times m]$ відповідно; K – матриця постійних коефіцієнтів розміром $[m \times n]$, на значення яких обмежень нема. Якщо вхідний параметр N опущений, то його значення приймається за нуль.

Рішення даної задачі, яка називається задачею лінійної інтегральної квадратичної оптимізації (LQR-оптимізації), в просторі станів визначається виразом:

$$u = R^{-1} B^T P x, \quad (7.8)$$

де матриця P має задовольняти рівняння Рікатті:

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0. \quad (7.9)$$

Від вагових матриць Q та R залежать обмеження відповідних координат. Якщо який-небудь елемент цих матриць дорівнює нулю, то відповідна координата обмежень не має.

7.2 Моделювання системи

Для рішення цієї задачі скористаємося засобами командного рядка MATLAB.

Для початку, необхідно перетворити матриці рівнянь станів у моделі рівнянь станів командою `ss`, задати назву кожній моделі станів та вказати назви їх входів/виходів:

```
% 1st equation
s1 = ss(A1, B1, C1, D1);
s1.StateName = {'theta', 'psi', 'theta_dot', 'psi_dot'};
s1.InputName = {'Vf', 'Vr'};
s1.OutputName = {'theta', 'psi', 'theta_dot', 'psi_dot'};
% 2nd equation
s2 = ss(A2, B2, C2, D2);
s2.StateName = {'phi', 'phi_dot'};
s2.InputName = {'Vf', 'Vr'};
s2.OutputName = {'phi', 'phi_dot'};
```

Значення матриць буде задано командами:

```
QQ = eye(4);
RR = eye(2);
де QQ – вагова матриця Q;
RR – вагова матриця R,
```

що створить одиничні діагональні матриці QQ та RR розмірністю $[4 \times 4]$ та $[2 \times 2]$ відповідно.

Задля мінімізації значень функціоналу (7.5) буде використано MATLAB функцію:

```
K_LQR = lqr(s1, QQ, RR);
де  $K_{LQR}$  – матриця оптимальних зворотних зв'язків по змінним стану  $x$ .
```

Модель підсистеми Controller буде відповідати за керування двигунами та стабілізацією рівноваги системи. Необхідні команди передано через MATLAB

скрипт файл control.m, вміст якого наведено в додатку В. Схема підсистеми Controller наведена на рисунку 7.1, складової підсистеми get states – на рисунку 7.2, а модель системи керування наведено у кресленику ІА61.130БАК.005 Д1.

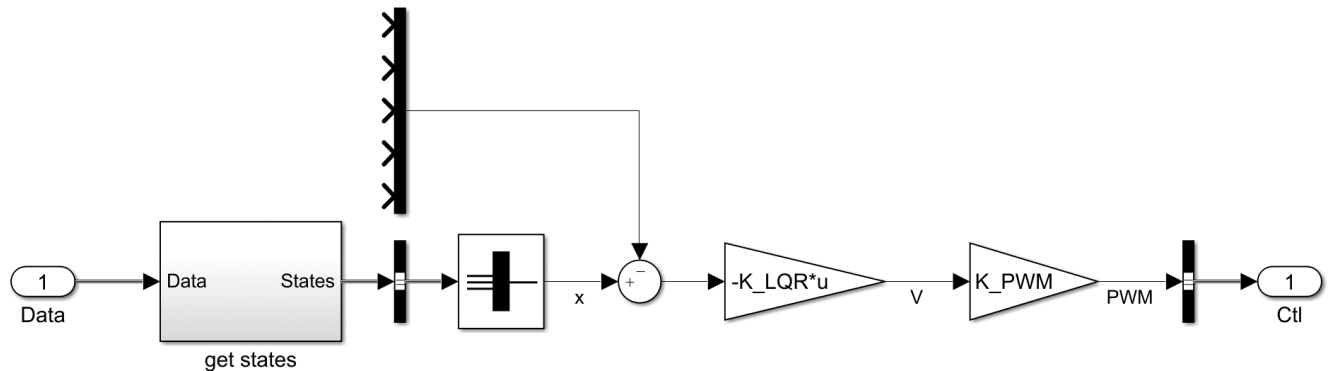


Рисунок 7.1 – Регулятор транспортної платформи

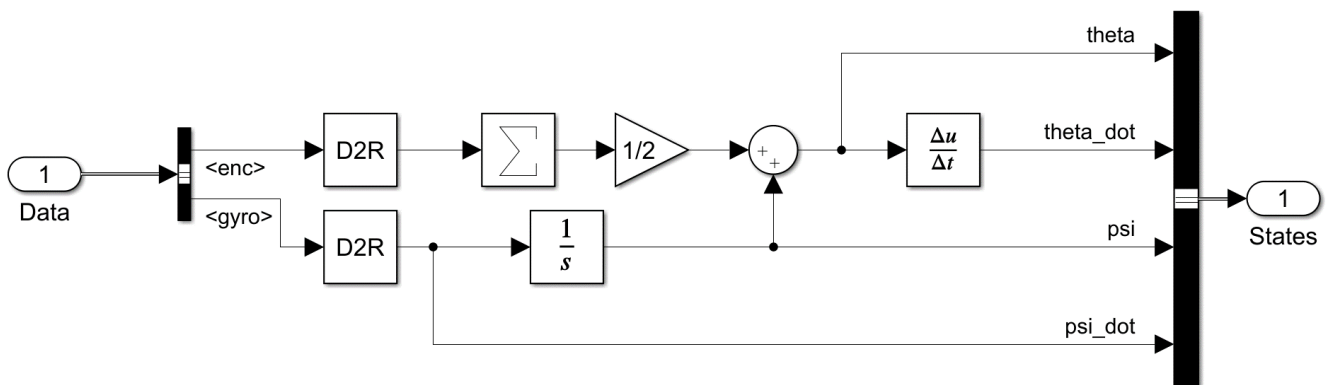


Рисунок 7.2 – Складові регулятора

Задля стабілізації платформи, їй необхідно знати свій вектор станів. Але система Controller отримує покази датчиків, які потрібно обробити. Необхідно передати дані підсистемі get states. Вектор станів, що необхідно отримати задано у формулі (7.10). На вході ж приймається сигнал з гіроскопа $\dot{\psi}$ та θ_{m_f} , θ_{m_r} з енкодерів. Підсистема get states виконує обробку отриманих сигналів з датчиків від підсистеми Plant.

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

Дані приходять в градусах, а розрахунки в системі відбуваються в радіанах, тому за допомогою спеціальних функціональних Gain блоків буде переведено значення з градусів у радіани. Значення з енкодерів буде додано та поділено навпіл задля знаходження середнього значення кута коліс. Сигнал з гіроскопа буде проінтегровано та додано до отриманого значення кута коліс, щоб врахувати положення відносно транспортної платформи. Необхідно розділити його на два сигнали та подати на віртуальну шину. Другий сигнал перед цим треба продиференціювати. Інтегрований та початковий сигнал гіроскопа також буде подано на віртуальну шину та передано сигнал з шини на вихід системи.

На виході з підсистеми `get states` у системі необхідно створити віртуальну шину для впорядкування змінних сигналу задля отримання чіткої послідовності сигналів. Для подальшої роботи з сигналом треба перетворити сигнал з шини у вектор станів за допомогою спеціального блоку `Bus to Vector`. Задля забезпечення керування системою необхідно відняти вектор стану x від вектору уставки по станам. Змінюючи значення вектору уставки надається можливість задавати вплив на поведінку системи, тобто керувати транспортною платформою. Задано нульові значення для вектору уставки, адже це бажане значення для всіх станів системи. Отримане значення за допомогою блоку `Gain`, налаштованого на матричне перемноження, буде помножено на матричний коефіцієнт K_{LQR} , розрахований раніше. На виході буде отримано вектор напруг, який в подальшому переведено у сигнал ШІМ та подано на вихід системи.

Змодельовану поведінку системи зображено графіками на рисунку 7.3.

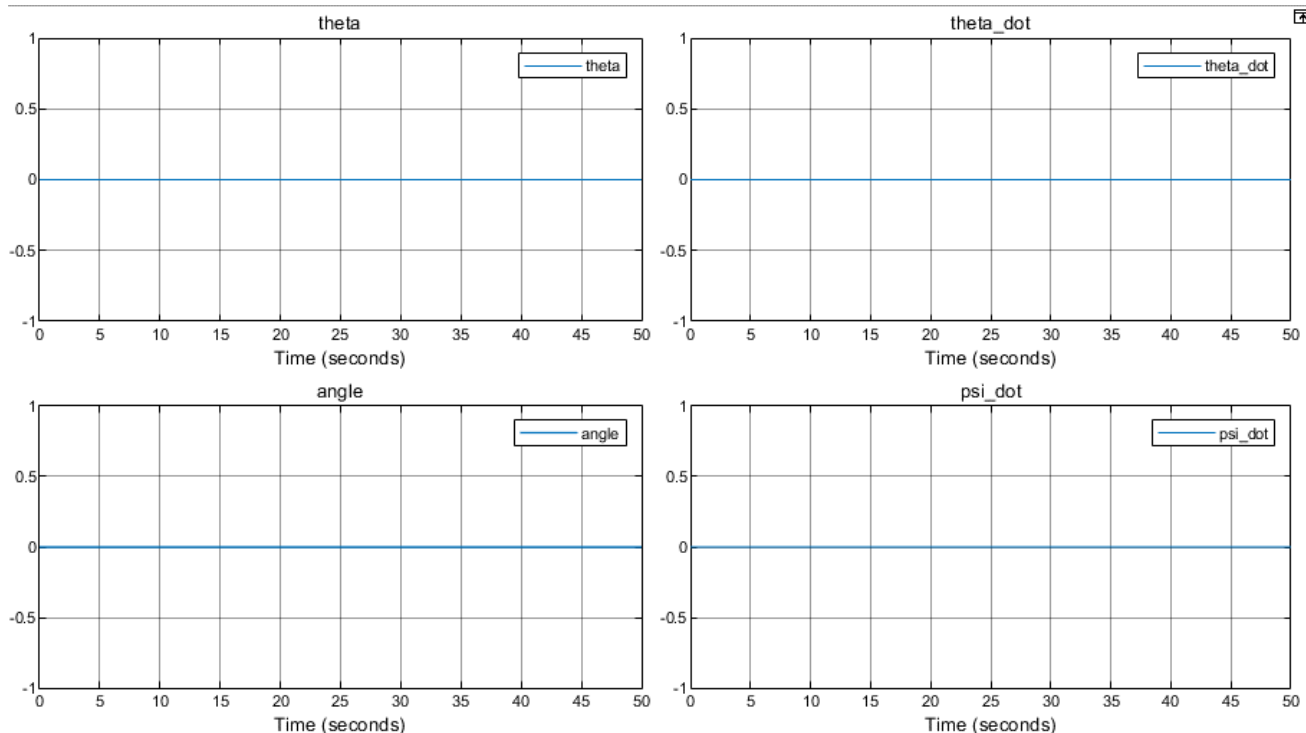


Рисунок 7.3 – Результати моделювання

У результаті моделювання отримано значення, рівні нулю, адже початкове збурення відсутнє і система знаходиться у стані рівноваги. Змінну значення кута відхилення системи буде задано у блоці моделі простору станів. Оскільки обчислення проходять в радіанах, то вхідне значення необхідно перетворити з градусів у радіани. Значення збурення задано в MATLAB скрипті `params.m` та має вигляд:

```
d2r = 1;
Psi0 = pi / 180 * d2r;
```

де `d2r` – початкове значення кута відхилення в градусах;

`Psi0` – переведення значення кута `d2r` з градусів у радіани.

Змодельовану поведінку системи зображено графіками на рисунку 7.4.

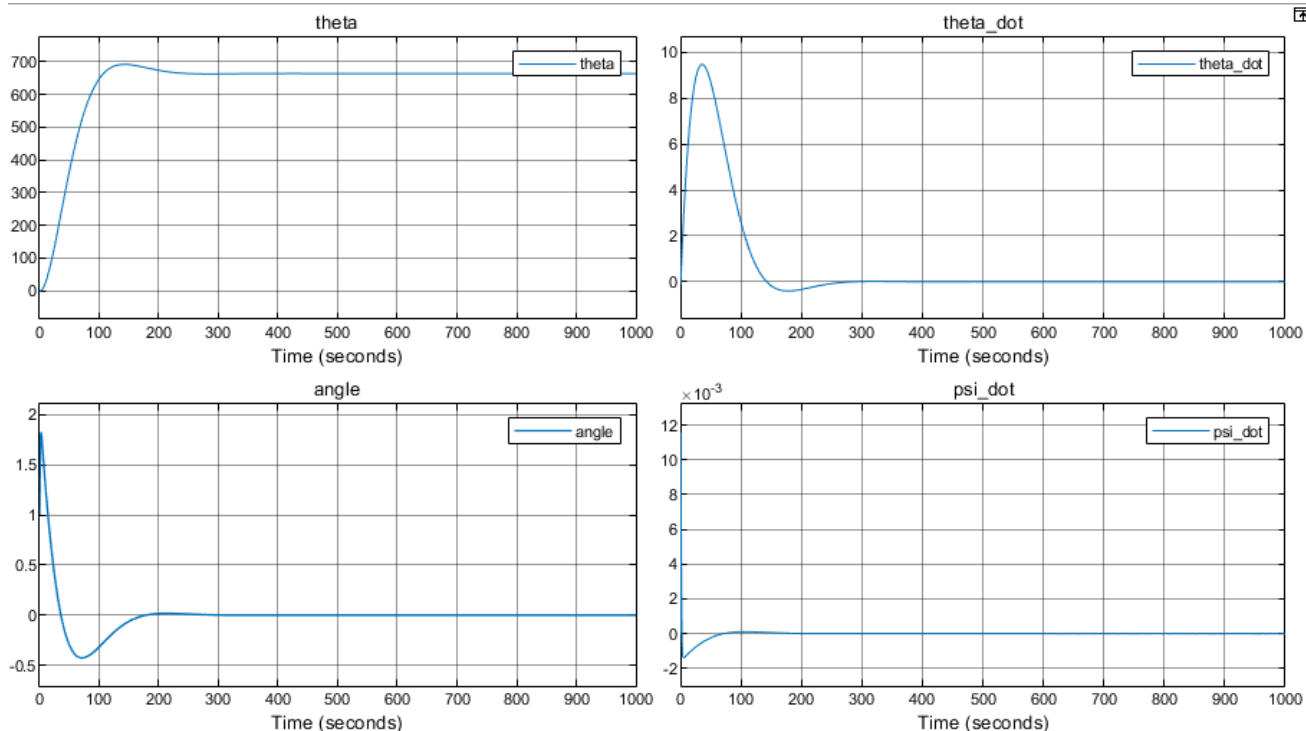


Рисунок 7.4 – Результати моделювання

З графіків видно, що регулювання відбувається і платформа стабілізується, але стабілізація відбувається занадто довго, що не задовольняє вимоги до системи. Також кут повороту коліс не відповідає бажаному заданому значенню, тому в системі наявна статична похибка. Необхідно додати інтегратор в контур управління, щоб її позбутися.

У просторі станів описуємо модель інтегратора за допомогою командного рядка MATLAB:

```
s0 = ss(1/tf('s'));
s0.StateName = 'theta_int';
s0.OutputName = 'theta_int';
```

Модель інтегратора необхідно об'єднати з моделлю станів системи:

```
s3 = append(s0, s1)
```

При об'єднанні було отримано помилки злиття в матрицях A , B та D , зображені на рисунку 7.5.


```

s3 =

A =
      theta_int      theta      psi      theta_dot      psi_dot
theta_int      0      0      0      0      0
theta      0      0      0      1      0
psi      0      0      0      0      1
theta_dot      0      0      -55.79      -0.000912      0.0001358
psi_dot      0      0      3.533      4.3e-05      -6.486e-06

B =
      ?      Vf      Vr
theta_int      1      0      0
theta      0      0      0
psi      0      0      0
theta_dot      0      0.002818      0.002818
psi_dot      0      -0.0001346      -0.0001346

C =
      theta_int      theta      psi      theta_dot      psi_dot
theta_int      1      0      0      0      0
theta      0      1      0      0      0
psi      0      0      1      0      0
theta_dot      0      0      0      1      0
psi_dot      0      0      0      0      1

D =
      ?      Vf      Vr
theta_int      0      0      0
theta      0      0      0
psi      0      0      0
theta_dot      0      0      0
psi_dot      0      0      0

```

Continuous-time state-space model.

Рисунок 7.5 – Помилки злиття моделей станів

Значення елементу a_{21} матриці A з точки зору математики мало б дорівнювати одиниці, адже $\int \dot{\theta} = \theta$, тому необхідно задати це значення вручну. Також треба видалити невідомі стовпчики в матрицях B та D . Для цього використано вказані нижче команди:

```

s3.A(1, 2) = 1;
s3(:, 1) = [];

```

У результаті буде отримано модель s3, що містить вектор п'яти станів. Також необхідно додати інтегратор в складовій підсистемі get states системи Controller, як

показано на рисунку 7.6. Враховуючи всі зміни, необхідно ще додати п'ятий елемент у векторі уставки по станам.

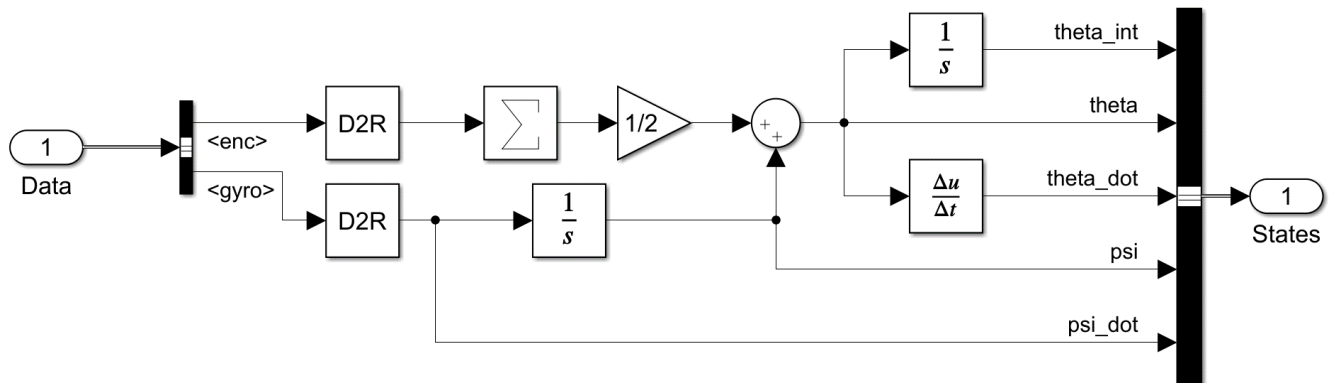


Рисунок 7.6 – Модифікована складова регулятора

Розмірність матриці Q теж необхідно збільшити. Зробити це можна командою `QQ = eye(5)`, а також замінити модель на `s3` в команді `K_LQR = lqr(s3, QQ, RR)`. Після чергового моделювання було отримано графіки, зображені на рисунку 7.7.

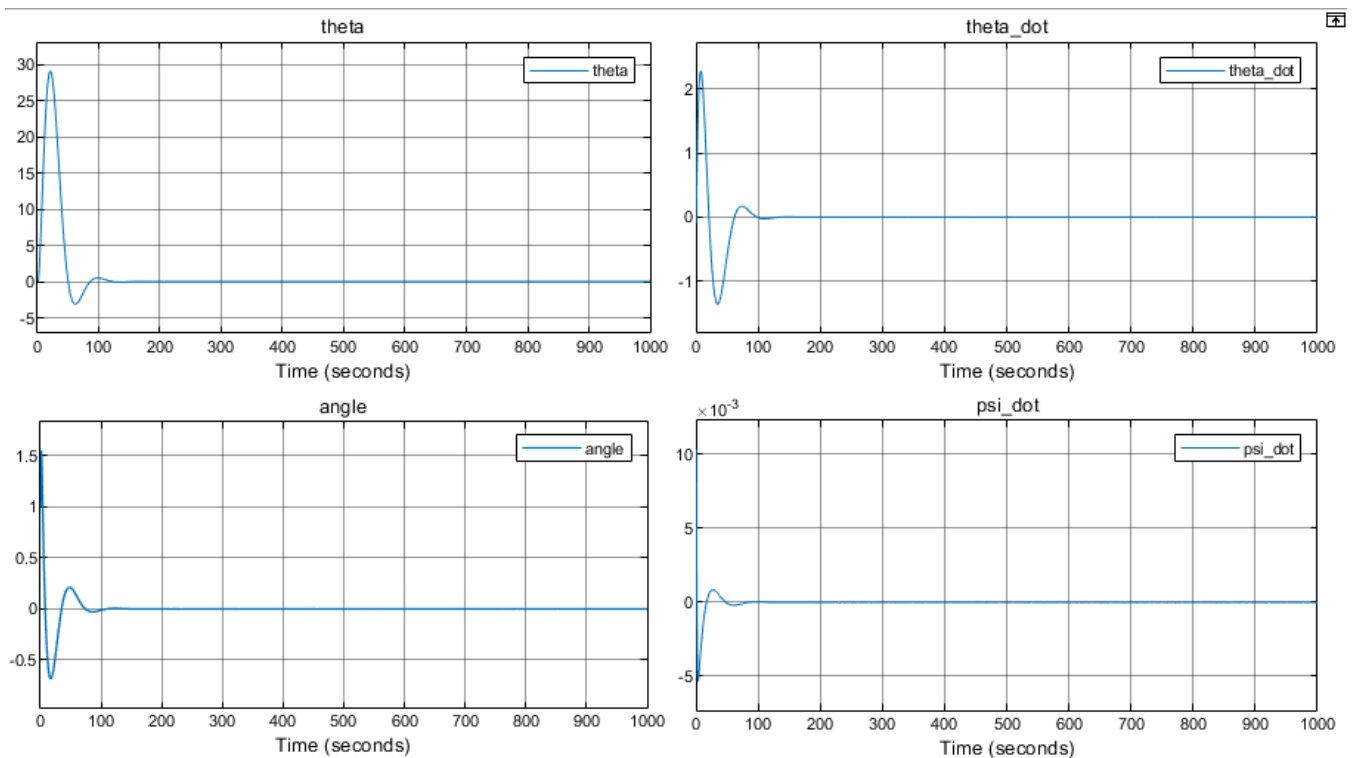


Рисунок 7.7 – Результати моделювання

Як видно, похибка керування відсутня. Регулювання відбувається близько 150 с-200 с. Це не задовольняє вимоги до системи, тому необхідно підібрати коефіцієнти матриць Q та R . Елементи матриці Q відповідають за вектор станів x . Чим більше значення коефіцієнтів, тим швидше система намагається привести певний стан у задане необхідне значення. Елементи матриці R відповідають за керування двигунами, тобто чим більше значення коефіцієнтів, тим різкіше відбувається управління.

Необхідно досягти стабільного положення системи за 20 с, тому необхідно підібрати коефіцієнти для елементів матриць Q та R , а також задати час моделювання 50 с. Розглянемо елементи матриці Q . Маємо вектор станів x , що після додавання інтегральної складової має вигляд транспонованої матриці (7.11).

$$x = \begin{bmatrix} \int \theta \\ \theta \\ \psi \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}. \quad (7.11)$$

Необхідно задати певні значення елементів q_{11} та q_{22} матриці Q , які відповідають за стани $\int \theta$ та θ у векторі станів x . Реалізовується це такими командами:

```
QQ(1,1) = 1e4;  
QQ(2,2) = 4e5;
```

Після моделювання із заданими коефіцієнтами було отримано графіки, що зображені на рисунку 7.8.

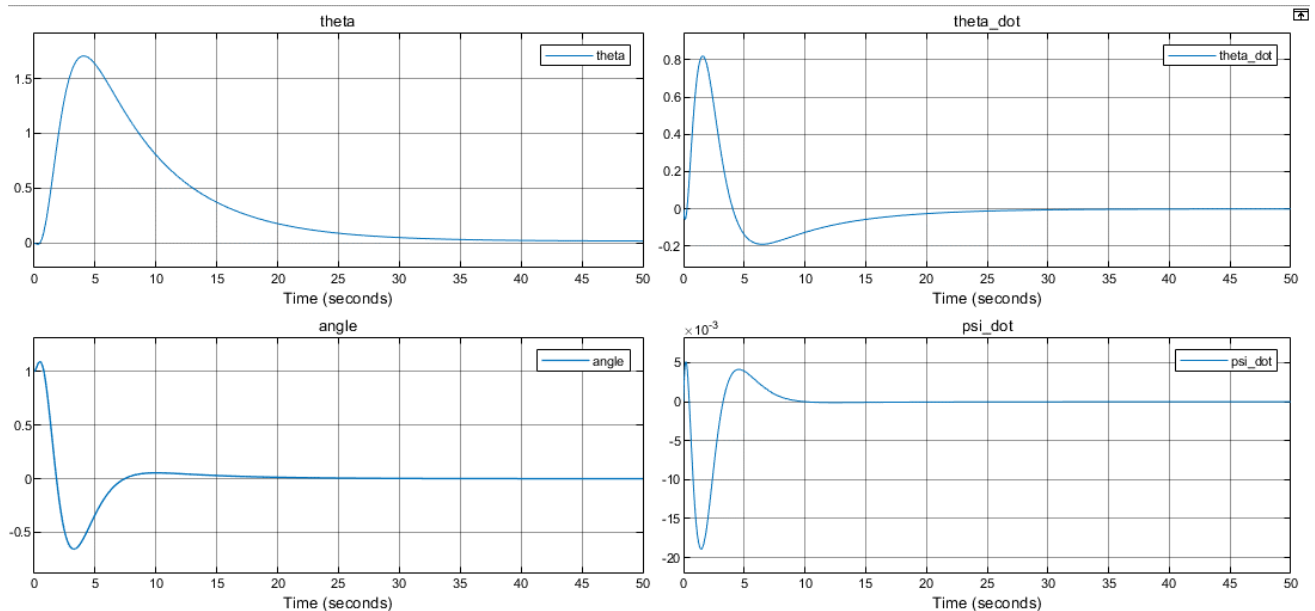


Рисунок 7.8 – результати моделювання після підбору коефіцієнтів матриці Q

Бачимо, що регулювання відбувається, проте коливання все ще сильні, що буде помітно при більших значеннях кута відхилення платформи, тому треба зменшити різкість управління моделі, щоб запобігти наслідкам. Значення матриці R буде задано командою $RR = 1e-2 * eye(2)$. Отримані після моделювання графіки поведінки системи зображено на рисунку 7.9.

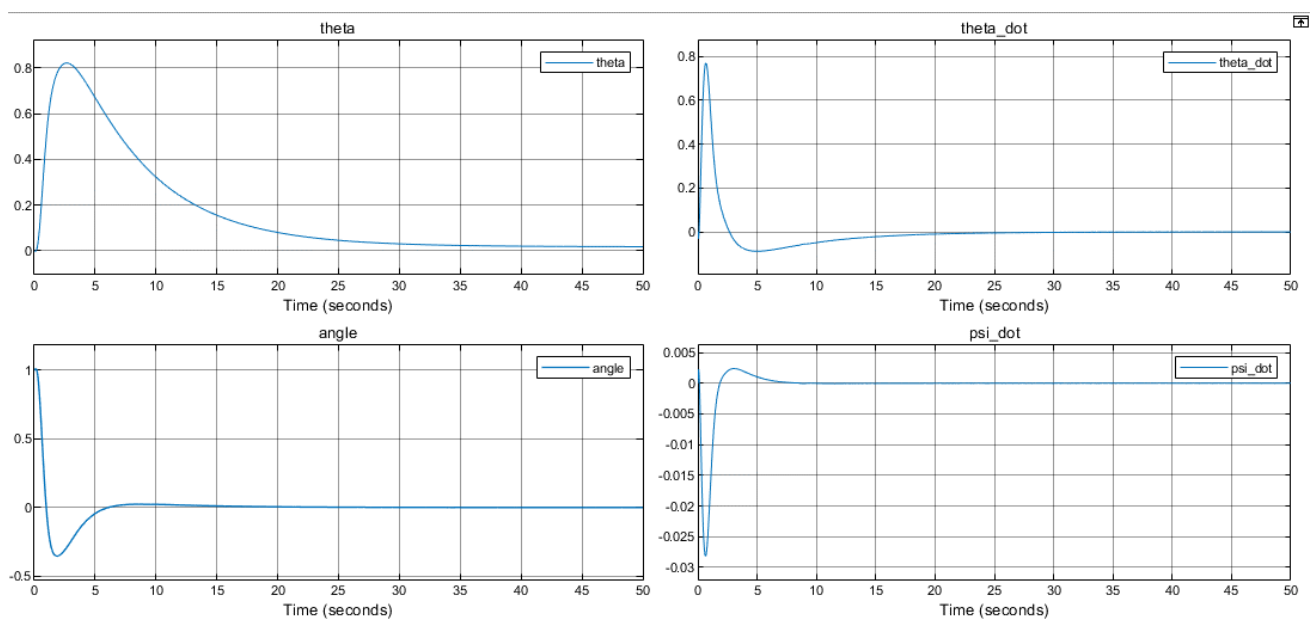


Рисунок 7.9 – Результати моделювання після остаточного підбору коефіцієнтів

Як видно, різкість коливань суттєво зменшилась, що дозволяє стверджувати – система повноцінно стабілізується.

Задля експерименту та наочності роботи системи керування додатково було задано початковий кут відхилення в 10° та отримано результати для оцінки поведінки системи при більших кутах відхилення. Результати моделювання зображено на рисунку 7.10.

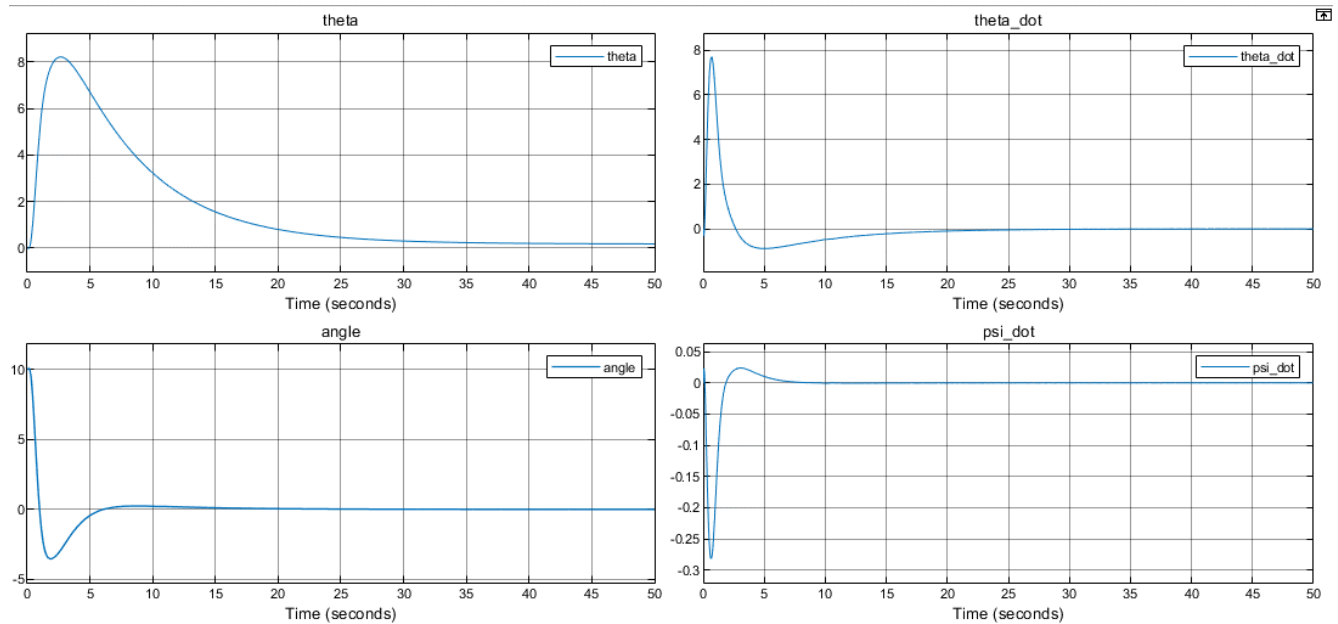


Рисунок 7.10 – Результати моделювання при значенні початкового кута відхилення в 10°

7.3 Висновки до розділу

У цьому розділі було розроблено систему керування стабілізацією гіроскопічної транспортної платформи за допомогою LQR-регулятора. Позитивні результати дозволяють зробити висновок, що реалізація даного транспортного засобу з точки зору математики цілком можлива та реальна.

ВИСНОВКИ

Метою даного проєкту є розширення використання дорожнього покриття за рахунок забезпечення руху гіроскопічних транспортних платформ.

Результатом виконання дипломного проєкту є система стабілізації гіроскопічної транспортної платформи.

Було розглянуто існуючі рішення в області гіроскопічних транспортних засобів задля оцінки можливості реалізації даного транспортного засобу.

Було розроблено структурну та функціональну схеми гіроплатформи. Схеми відображають будову, структуру поєднання елементів та можливу функціональність системи. Кожна схема має повний словесний опис її елементів.

Розроблено математичну модель системи. Була врахована можливість обирати параметри транспортної платформи, включаючи характеристики двигунів, для моделювання системи. За допомогою засобів моделювання MATLAB/Simulink було проаналізовано поведінку системи. Після дослідження системи та аналізу результатів був розроблений цифровий LQR-регулятор.

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
						57
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вікіпедія [Електронний ресурс]: Гіроскоп. – Назва з екрана. Доступ: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Гіроскоп/>
2. Патент 621364 США. Device for starting torpedoes / L. O'BRY; заявл. 28.05.1898; опубл. 21.03.1899 – 3с.
3. Большая российская энциклопедия [Електронний ресурс]: Гироскоп. – Назва з екрана. Доступ: <https://bigenc.ru/physics/text/2362236>
4. HONOR [Електронний ресурс]: HONOR 9X: стабилизация изображения видео на базе искусственного интеллекта. – Назва з екрана. Доступ: <https://community.honor.ru/topic/32102/detail.htm>
5. Карасев В. В Эволюция гироскопа / Карасев В. В., Вовченко Н. В. // Научные труды Дальрыбвтуза – 2009. – 11 с.
6. Industry tap info news [Електронний ресурс]: The Incredible Future Of Public Transport With This Gyroscopic Vehicle Design. – Назва з екрана. Доступ: <https://www.industrytap.com/incredible-future-public-transport-gyroscopic-vehicle-design/43587>
7. Автобизнес [Електронний ресурс]: Ford Gyron: двухколесные автомобили – реальность прошлого, перспектива будущего. – Назва з екрана. Доступ: <https://www.abw.by/novosti/other/180549>
8. Сегодня [Електронний ресурс]: Китайцы разработали двухколесный автомобиль-мотоцикл: фото. – Назва з екрана. Доступ: <https://www.segodnya.ua/economics/avto/kitaycy-razrabotali-dvuhkolesnyy-avtomobil-motocikl-foto-1144514.html>
9. BikeArt [Електронний ресурс]: Smart Pro 10" Красный. – Назва з екрана. Доступ: <https://bikeart.com.ua/product/giroskuter-smart-pro-10-krasnyy/>
10. ТЕХ.ПРИБОРЫ.РУ [Електронний ресурс]: Описание гироскутера. – Назва з екрана. Доступ: <https://tehpribory.ru/glavnaia/raznoe/giroskuter.html>
11. Seaships [Електронний ресурс]: Как устроены морские суда. – Назва з екрана. Доступ: <http://www.seaships.ru/becalm.htm>

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		58

12. Seakeeper [Електронний ресурс]: Seakeeper 5. – Назва з екрана.
Доступ: https://www.seakeeper.com/seakeeper_products/seakeeper-5/
13. Амперка [Електронний ресурс]: Что такое лидар. – Назва з екрана.
Доступ: <https://amperka.ru/page/lidar-sensors-guide>
14. IEEE Spectrum [Електронний ресурс]: Under the Hood of Luminar's Long-Reach Lidar. – Назва з екрана. Доступ: <https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/self-driving/under-the-hood-of-luminars-long-reach-lidar>
15. vc.ru [Електронний ресурс]: «Яндекс» разработал собственные лидары для беспилотных автомобилей. – Назва з екрана. Доступ: <https://vc.ru/transport/97355-yandeks-razrabotal-sobstvennye-lidary-dlya-bespilotnyh-avtomobiley>
16. Motor Authority News [Електронний ресурс]: Michelin Active Wheel technology in detail – Назва з екрана. Доступ: https://www.motorauthority.com/news/1030025_michelins-active-wheel-technology-in-detail
17. Michelin active wheel 2008 Paris Motor Show [Електронний ресурс]: – Press Kit – Електронні текстові дані (1 файл: 384 кбайт) – 7 с. – Назва з екрана.
Доступ: <https://web.archive.org/web/20140528010022/http://www.michelin.com/corporate/EN/content/newsAndPress/7735-MICHCORP-salonauto2008.pdf>
18. Golden motor [Електронний ресурс]: Clean, Efficient, Light Weight, Powerful BLDC Motor Drive Kits – Назва з екрана. Доступ: <https://www.goldenmotor.com/eCar/frame-eCar.htm>
19. Golden motor [Електронний ресурс]: HPM-20KW – High Power BLDC Motor Data – Електронні текстові дані (1 файл: 41 кбайт) – 1 с. – Назва з екрана.
Доступ: <https://www.goldenmotor.com/eCar/HPM-20KW-Performance%20Data.pdf>
20. Adafruit [Електронний ресурс]: 9-DOF Absolute Orientation IMU Fusion Breakout - BNO055 – Назва з екрана. Доступ: <https://www.adafruit.com/product/2472>
21. SimCom [Електронний ресурс]: SIM68R – Назва з екрана.
Доступ: <https://www.simcom.com/product/SIM68R.html>

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		59

22. Lifewire [Електронний ресурс]: How Are 4G and 5G Different? – Назва з екрана. Доступ: <https://www.lifewire.com/5g-vs-4g-4156322>
23. SimCom [Електронний ресурс]: SIM8300G-M2 – Назва з екрана. Доступ: <https://www.simcom.com/product/SIM8300GM2.html>
24. Репнікова Н.Б. Теорія автоматичного керування: класика і сучасність: підруч. / Н.Б. Репнікова. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 328 с
25. Кибардин В.В. Критерии оптимального управления и LQR-оптимизация в электроприводе / Кибардин В.В., Ковалева О. А., Язев В.Н. // Вестник Красноярского Государственного Аграрного Университета – 2015 – №12 – с. 61-73
26. Оформлення текстових документів у навчальному процесі. Стандарт організації (кафедри) СОУ АУТС 01-16. Для студентів кафедри автоматики та управління в технічних системах [Текст] / Уклад.: Я.Ю. Дорогий, Н.Б. Репнікова, О.І. Ролік, Л.Ю. Юрчук – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 27 с.
27. Дипломний проєкт бакалавра. Розробка, оформлення, захист [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. які навчаються за напрямками підготовки 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та 121 Інженерія програмного забезпечення /КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Я.Ю. Дорогий, К.С. Дорошенко, Н.Б. Репнікова, Л.Ю. Юрчук., Ю.С. Тимофєєва – Електронні текстові дані (1 файл: 2,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 78 с.

					IA61.130БАК.005 ПЗ	Ар-
Зм.	Ар-	№ докум.	Підпис	Лат		60